



**Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL:** Diseño de un alternador de flujo conmutado para generación mini-eólica

**AUTORS:** Guardia Palomera, Gonzalo

**DATA DE PRESENTACIÓ:** Julio, 2016

**COGNOMS:** Guardia Palomera   **NOM:** Gonzalo

**TITULACIÓ:** Grado en Ingeniería Eléctrica

**PLA:**

**DIRECTOR:** Pere Andrada Gastón

**DEPARTAMENT:** Ingeniería Eléctrica

**QUALIFICACIÓ DEL TFG**

**TRIBUNAL**

**PRESIDENT**

**Josep Mateu Font**

**SECRETARI**

**Ramón Caumons Sangra**

**VOCAL**

**Carlos Prudencio de Gracia**

**DATA DE LECTURA: 12/07/16**

**Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals:**   ☒ **Sí**   ☐ **No**

## RESUMEN

Este proyecto se basa en realizar el diseño electro-mecánico de un alternador trifásico de flujo conmutado. Dicho alternador, se acoplará de forma directa a un aerogenerador de mini-eólica real fabricado por una empresa española llamada "Bornay". Por lo tanto, los parámetros que determinarán el alternador serán hallados según las características del aerogenerador real.

Una vez seleccionado el tipo de aerogenerador que vamos a utilizar, se establecerán las restricciones de diseño del propio alternador y se realizará el dimensionamiento de este. Según las características del aerogenerador "Bornay", el alternador está diseñado para entregar una potencia eléctrica de 6 kW trabajando a una velocidad de rotación nominal de 400 rpm.

Para poder realizar el diseño de un alternador con buenas prestaciones, se han seleccionado materiales de alta calidad y que se ajustan técnicamente a las restricciones físicas del alternador. Una vez realizado el dimensionamiento y la elección de materiales, se realizan las simulaciones pertinentes con el programa de diseño "Femm". Gracias a las simulaciones, podemos obtener características electromagnéticas de nuestro alternador y por lo tanto conocer sus parámetros y determinar si el diseño es válido o no.

Finalmente, se han realizado los planos del estator y rotor del alternador para una posible construcción real del alternador. Asimismo, se ha realizado un estudio económico de coste y de manufacturación del propio alternador.

### Paraules clau (màxim 10):

Diseño	Aerogenerador	Alternador flujo conmutado	trifásico
Mini-eólica	FSPM		

## ABSTRACT

The aim of this project is to create an electrical and mechanical design of a flux-switching alternator three-phase. This alternator will be coupled directly to an authentic and small wind turbine, which has been fabricated by a Spanish company called "Bornay". Hence, the parameters that will define the alternator will be determined according to the characteristics of the aero-turbine.

Once the type of aero-turbine that will be used has been selected, the restrictions of the design of the alternator will be established and the sizing of it will be made. According to the characteristics of the aero-turbine "Bornay", the alternator is prepared to provide 6 kW of electric power working at a speed of 400 rpm of nominal rotation.

In order to be able to design an alternator with good performances, materials of high quality that adjust to the technical and physical restrictions of the alternator have been selected. Once the sizing and the choosing of materials have been done, the appropriate simulations will be carried out with the software "Femm". Thanks to these simulations, we can get electromagnetic characteristics of our alternator. Therefore, we will be able to know its parameters and determine whether the design is acceptable or not.

Finally, the plans of the stator and rotor have been made in order to construct a real prototype. Additionally, an economical and manufacturing study of the electrical machine has been done.

--

**Keywords (10 maximum):**

Design	Wind turbine	Flux-switching machine	Three phase
Small wind generation	FSPM		

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....</b>	<b>9</b>
1.1 Alcance del proyecto .....	9
<b>2. GENERACIÓN MINI-EÓLICA .....</b>	<b>10</b>
2.1 Actualidad de la mini-eólica .....	10
2.1.1 Actualidad en España.....	10
2.1.2 Actualidad Internacional.....	11
2.2 tecnología de los aerogeneradores.....	12
2.2.1 Conversión electro-mecánica .....	12
2.2.2. Caja multiplicadora .....	16
2.2.3. Electrónica de potencia .....	16
2.2.4. Regulación de los aerogeneradores .....	17
2.2.5. Configuraciones del aerogenerador .....	19
2.3 Configuración propia del aerogenerador a diseñar.....	22
<b>3. ALTERNADOR DE FLUJO CONMUTADO .....</b>	<b>23</b>
3.1 Aplicaciones principales .....	23
3.2 Principio de funcionamiento .....	23
3.2.1 Estructura física máquina síncrona convencional.....	23
3.2.2 Estructura física máquina de flujo conmutado .....	25
3.3 Principio de funcionamiento como generador eléctrico .....	26
3.4 Características técnicas .....	29
3.5 Materiales de la máquina.....	29
3.4.1. Materiales magnéticos blandos.....	29
3.4.2. Materiales ferromagnéticos duros .....	32
3.4.3. Materiales conductores.....	35
<b>4. DISEÑO ALTERNADOR FLUJO CONMUTADO .....</b>	<b>37</b>
4.1 Ecuaciones paramétricas .....	37
4.2 Dimensiones del alternador de flujo conmutado.....	37
4.3 Diseño de la máquina.....	38
4.3.1 Obtención características del alternador.....	38
4.3.2 Dimensionamiento con ecuaciones paramétricas .....	42
4.4 Cálculo de parámetros .....	46
4.4.1 Inducción en el entrehierro .....	46
4.4.2 Cálculo resistencia de fase .....	48

4.4.3	Fuerza electromotriz inducida .....	49
4.4.4	Cálculo inductancias de fase .....	51
4.4.5	Cálculo del par parásito .....	56
4.4.6	Par estático .....	57
4.4.7	Par electromagnético.....	58
4.4.8	Cálculo de pérdidas y rendimiento .....	59
<b>4.5</b>	<b>Características finales.....</b>	<b>62</b>
<b>4.6</b>	<b>Masa de materiales .....</b>	<b>63</b>
<b>5.</b>	<b>CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS .....</b>	<b>64</b>
<b>6.</b>	<b>MONTAJE DE LA MÁQUINA.....</b>	<b>68</b>
<b>7.</b>	<b>COMPARATIVA COMERCIAL.....</b>	<b>72</b>
<b>8.</b>	<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA PROTOTIPO.....</b>	<b>73</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
	<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>76</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXO.....</b>	<b>78</b>





## RESUMEN DE SIGNOS Y ABREVIATURAS

**FSPM = flux switching permanent magnet (máquina flujo conmutado)**

**$n_s$  = velocidad de sincronismo (rpm)**

**$n$  = velocidad de rotación (rpm)**

**$Q_s$  = número polos salientes del estator**

**$Q_R$  = número de dientes rotor**

**$p$  = número de par de polos de la máquina**

**$\psi$  = flujo concatenado (Wb)**

**$e$  = fuerza electromotriz instantánea (V)**

**$E$  = fuerza electromotriz eficaz (V)**

**$\hat{E}$  = fuerza electromotriz máxima (V)**

**$T$  = Par (Nm)**

**$k_d$  = factor flujo de dispersión**

**$c_s$  = ratio anchura diente rotor ; paso de ranura estator**

**$A_c$  = carga lineal específica (A/m)**

**$\hat{B}_\delta$  = inducción máxima en el entrehierro (T)**

**$N_{ph}$  = vueltas por fase**

**$N_b$  = vueltas por bobina**

**$\omega$  = velocidad angular (rad/s)**

**$D_{s,i}$  = diámetro interior estator (m)**

**$D_{s,o}$  = diámetro exterior estator (m)**

**$l$  = longitud motor (m)**

**$k_{i,o}$  = relación diámetros estator**

**$\tau_s$  = paso de ranura del estator (m)**

**$\eta$  = rendimiento (%)**

**$P$  = potencia (W)**

**$\lambda$  = velocidad específica**

**$r$  = radio palas aerogenerador**

**$v$  = velocidad del viento (m/s)**

**$\Delta$  = densidad de corriente (A/mm<sup>2</sup>)**

**$m$  = número de fases**

**$V_L$  = tensión de línea (V)**

**$V_F$  = tensión de fase (V)**

**$I_f$  = intensidad de fase (A)**

**$\cos\phi$  = factor de potencia**

**$k_v$  = factor de ventana**

**$f_e$  = frecuencia eléctrica (Hz)**

**$\omega_e$  = frecuencia angular eléctrica (rad/s)**

**$\delta$  = entrehierro (m)**

**$A_{ranura}$  = área ranura (m<sup>2</sup>)**

**$A_{Cu}$  = área cobre (m<sup>2</sup>)**

**$S_c$  = sección conductor (mm<sup>2</sup>)**

**$\varnothing_{conductor}$  = diámetro conductor (mm)**

**$n_c$  = número conductores en paralelo**

**$R_{ph}$  = resistencia de fase ( $\Omega$ )**

**$L$  = inductancia (H)**

**$\phi$  = flujo magnético (Wb)**

**$\mathfrak{R}_m$  = reluctancia magnética (Av/Wb)**



## INTRODUCCIÓN

Este proyecto final de carrera consiste en diseñar un alternador síncrono de flujo conmutado para generación mini-eólica.

Una máquina de flujo conmutado, flux switching machine en inglés (FSPM), es una máquina síncrona con excitación, generalmente, por imanes permanentes, con polos salientes tanto en el rotor como en el estator. El estator está conformado por polos salientes. Cada polo saliente tiene su propio devanado concentrado trifásico, donde también en el interior de dicho polo alberga en una ranura con un imán permanente magnetizado de forma tangencial. Por otro lado, el rotor está constituido simplemente por dientes salientes de material ferromagnético sin utilizar imanes o bobinados.

El proyecto se centrará en diseñar un alternador de dicha categoría el cual irá acoplado a un aerogenerador totalmente real y comercial. Por lo tanto los cálculos se realizarán en función de las características proporcionadas por la ficha técnica del aerogenerador a elegir.

## **1. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El principal objetivo del proyecto es realizar el diseño íntegro de un alternador de flujo conmutado para generación eléctrica a partir de un aerogenerador de mini-eólica comercial. Por lo tanto, se tendrán que calcular todos los parámetros relacionados con el alternador ya definidos previamente por el aerogenerador que se va a utilizar.

El primer objetivo es la elección del aerogenerador ya que es la base principal del proyecto. Se ha escogido un aerogenerador comercial de marca Española llamada Bornay. El tipo de turbina es un Bornay 6000, capaz de entregar en condiciones nominales una potencia de 6 kW. Por otro lado, ya comentado anteriormente, es realizar el diseño electro-mecánico del alternador intentando minimizar costes obteniendo unas ciertas prestaciones. Por eso, es necesario escoger todos los materiales y obtener las características internas del alternador para poder acoplar dicho alternador a la turbina obteniendo altas prestaciones. Como último objetivo, se trata de realizar una comparativa con los distintos tipos de alternadores del mismo tipo o similares que existen en el mercado para poder evaluar el trabajo realizado.

### **1.1 ALCANCE DEL PROYECTO**

El proyecto no solo tratará sobre el diseño del alternador sino que involucrará muchos otros aspectos relacionados con la generación y comercialización de generadores de mini-eólica.

Primeramente, el proyecto dará una perspectiva general de la generación mini-eólica a nivel nacional e internacional. Por eso se tratan temas sobre la actualidad, tipos de aplicación de esta, evolución tecnológica, constitución física y control de los aerogeneradores. Además haciendo un repaso de las diferentes posibilidades técnicas a la hora de realizar los diseños de estos y que tipos de máquina generadoras se utilizan en el mercado actualmente.

Otro campo de estudio, es el régimen de funcionamiento tanto del propio generador como del aerogenerador. Estos dos elementos trabajan de forma simultánea, por lo tanto es necesario saber cuáles serán sus características y sus regímenes de trabajo para realizar un diseño correcto. A partir del conocimiento de sus regímenes, se dará paso al diseño del propio alternador.

El proyecto en sí, se centrará en el diseño electro-mecánico del alternador mediante el uso de un programa de elementos finitos. Éste, nos permitirá obtener las características del alternador y ver si el diseño es correcto o no según los objetivos marcados. Otro aspecto que se trata, es la elección de convertidores para rectificar la tensión de salida del propio alternador, ya que dicha tensión variará sus características en función de la velocidad del viento.

Para finalizar, se realizará un estudio de coste del alternador, un análisis del montaje del alternador y una comparativa respecto otros alternadores comerciales del mismo tipo o similar.

## **2. GENERACIÓN MINI-EÓLICA**

La energía mini-eólica es el aprovechamiento de los recursos eólicos mediante la utilización de aerogeneradores de potencia inferior a los 100 kW. Actualmente conocemos la energía mini-eólica como aquella generación de electricidad mediante molinos eólicos de baja potencia. Estos son utilizados mayoritariamente para alimentar pequeños consumos, principalmente en lugares aislados.

El uso de esta tecnología conlleva grandes ventajas, por ejemplo:

- Generación próxima al punto de consumo
- Versatilidad de aplicaciones
- Funcionamiento con vientos moderados
- Suministro a lugares remotos
- Bajo coste de operación y mantenimiento
- Bajo impacto ambiental

Gracias a estas ventajas, se han desarrollado con cierta rapidez. La gran mayoría de empresas relacionadas con el sector, diseñan y desarrollan generadores de hasta 10 kW. Pero no obstante, ciertas empresas desarrollan generadores de mini-eólica de hasta 100 kW para alimentar zonas remotas de uso particular e industrial.

### **2.1 ACTUALIDAD DE LA MINI-EÓLICA**

Actualmente el uso de la generación mini-eólica no está muy extendido a nivel nacional debido a las leyes que dificultan su implantación. Contrariamente en otros países europeos o de otros continentes su uso es mucho más pronunciado debido a sus indudables beneficios que tiene su uso.

Es cierto que aún no es un campo totalmente desarrollado, pero actualmente existen diversas empresas dedicadas únicamente a éste tipo de aerogeneradores de pequeña potencia.

#### **2.1.1 ACTUALIDAD EN ESPAÑA**

Históricamente en España, el uso de mini-eólica ha sido utilizado para el autoconsumo de pequeñas instalaciones aisladas de red. El sector mini-eólico español, con unos 8 MW instalados, ha realizado en los últimos años un importante esfuerzo de inversión en innovación y desarrollo. Frente a esa apuesta de futuro, existe un bloqueo del Gobierno al desarrollo del autoconsumo y la generación distribuida. Esto está empujando a los empresarios de generación mini-eólica a una mudanza forzosa al extranjero.

## 2.1.2 ACTUALIDAD INTERNACIONAL

A finales de 2011, según “World Wind Energy Associatoin”, fueron instaladas 730.000 unidades productoras de mini-eólica (excluyendo India e Italia).

Actualmente, China, copa el mercado de instalaciones de dicho tipo, seguidos por EEUU y UK con lo cual estos tres países abarcan el 93% de las unidades instaladas en todo el mundo.

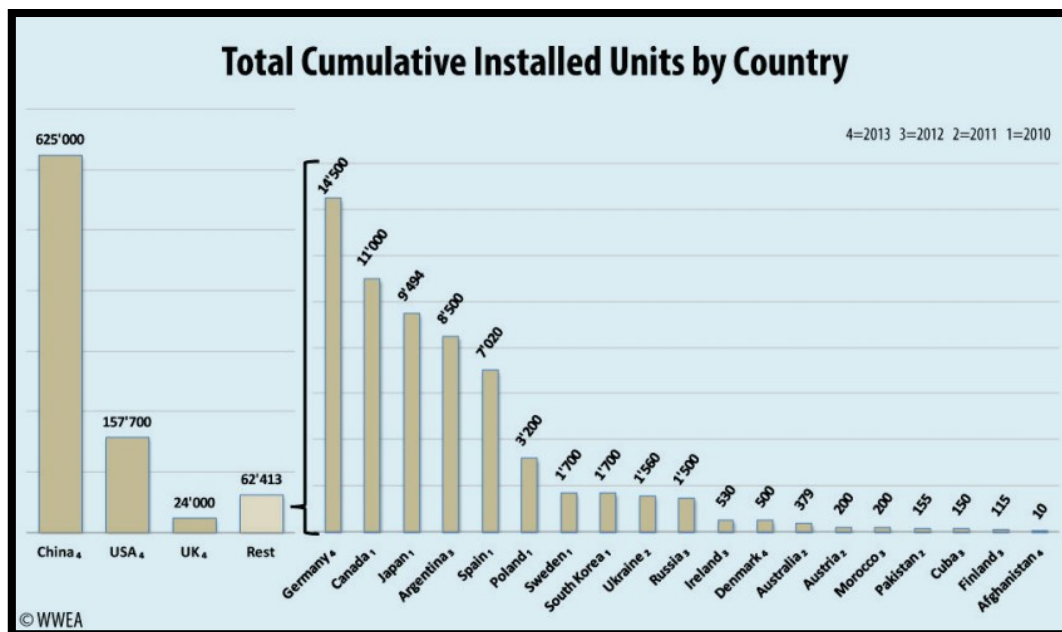


Figura 1: Unidades instaladas acumuladas por países

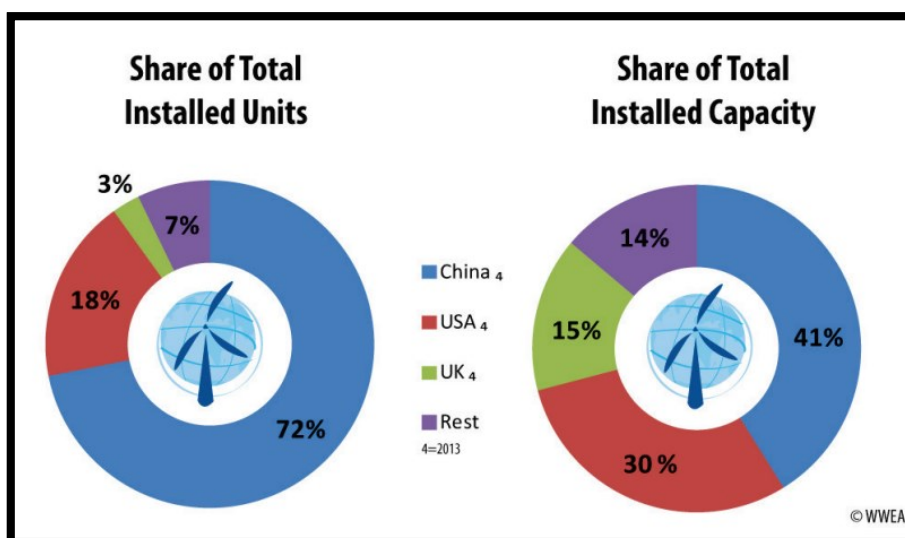


Figura 2: Unidades instaladas y potencia instalada por países

Cinco países (Canadá, China, Alemania, UK y EEUU) cuentan con el 50% de la industria manufacturera de mini-eólica. Hasta 2011, más de 330 empresas relacionadas con la energía mini-eólica han sido identificadas ofreciendo servicios de comercialización de piezas, tecnología, consultoría y ventas.

## **2.2 TECNOLOGÍA DE LOS AEROGENERADORES**

Existen diferentes tecnologías implantadas en los aerogeneradores actuales. Por lo tanto estudiaremos los elementos que conforman a las turbinas eólicas.

El rotor de un aerogenerador puede ser: monopala, bipala, tripala y multipala. Un mayor número de palas reducirá su coste, pero requieren una velocidad mayor de rotación. Por otro lado, un generador tripala requiere una velocidad menor de rotación y aerodinámicamente es más equilibrado. En cualquier caso la potencia de la turbina dependerá del radio de barrido de las palas.

Los materiales actuales de diseño de las palas son de resinas epoxi, aluminio, fibra de vidrio reforzada e incluso fibra de carbono, así mejorando sus características mecánicas frente a sus predecesores como el metal, madera, tela etc. Normalmente, este tipo de turbinas trabajan a bajas velocidades, por lo cual se suele utilizar generadores síncronos acoplados directamente al eje del rotor. En algunos casos excepcionales, se utilizan generadores de inducción utilizando cajas multiplicadoras para poder llegar a velocidad de sincronismo.

### **2.2.1 CONVERSIÓN ELECTRO-MECÁNICA**

La producción de energía eléctrica se produce mediante la conversión energética de la energía mecánica a eléctrica. La máquina encargada de ello es el generador eléctrico. El generador eléctrico recibe rotación en su eje proveniente de la turbina, al rotar el eje del alternador, produce energía eléctrica.

Los generadores de inducción deben estar siempre conectados a red, o a una fuente de potencia reactiva, como puede ser una batería de condensadores para poder trabajar en modo aislado. La velocidad de rotación del aerogenerador casi siempre suele ser constante una vez el generador asíncrono esté conectado a red. Por lo tanto la velocidad de rotación del generador será proporcional a la frecuencia de la red y al número de polos del generador. También es común, generadores asíncronos con conmutación de polos para poder trabajar a diferentes velocidades de rotación.

Por otro lado, los generadores síncronos disponen de excitación propia mediante electroimanes o imanes permanentes. Esto hace que pueda trabajar aislado de red sin ningún tipo de dificultad. Así, al variar la velocidad de rotación, la frecuencia de salida del generador variará, por lo que con éste tipo de diseño es necesario que se disponga de un rectificador o convertidor AC/DC. Posteriormente, se necesita de otro convertidor DC/AC para poder generar electricidad a una cierta tensión y frecuencia establecida.

Finalmente, el diseño del generador tiene que tener un par de arranque pequeño, para poder facilitar la puesta en marcha con bajas velocidades de viento, aprovechando así el máximo el recurso eólico.

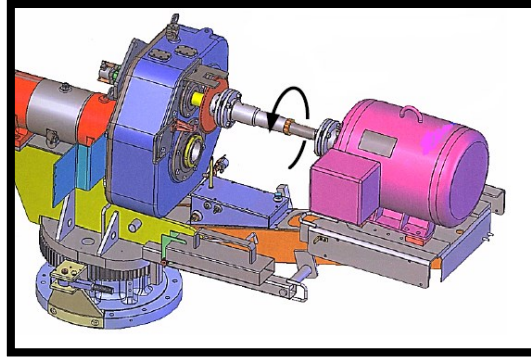


Figura 3: Conversión electro-mecánica



Figura 4: Generador eléctrico

Actualmente existen diversas empresas que se dedican a la comercialización de componentes y aeroturbinas de mini-eólica. Por ello también es objeto de estudio ver qué tipo de generadores eléctricos utilizan las principales empresas comercializadoras. La gran mayoría de ellas trabajan con aerogeneradores de eje horizontal, pero no obstante algunas de estas empresas optan por utilizar generadores de eje vertical, como puede ser aerogeneradores del tipo Daerrius, Savonius o multipala. Por lo tanto, dependiendo del diseño del aerogenerador, se utilizará un tipo de alternador u otro. Mayoritariamente los generadores elegidos para generar electricidad son de tipo síncrono con excitación por imanes permanentes.

Esta es la lista de algunas empresas productoras de pequeños aerogeneradores y sus respectivos alternadores utilizados.

#### Aerogeneradores Bornay (eje horizontal)

Bornay es una empresa española creada en 1970 donde se centran en el diseño y producción de pequeños aerogeneradores para uso industrial o particular.

##### **Bornay 600**

- Alternador trifásico de imanes permanentes
- Imanes de ferrita
- 600 W
- 12, 24, 48 V
- 1000 rpm

##### **Bornay 1500**

- Alternador trifásico de imanes permanentes
- Imanes de neodimio
- 1500 W
- 24, 48, 120 V
- 700 rpm



### **Bornay 3000**

- Alternador trifásico de imanes permanentes
- Imanes de neodimio
- 3000 W
- 24, 48, 120 V
- 500 rpm

### **Bornay 6000**

- Alternador trifásico de imanes permanentes
- Imanes de neodimio
- 6000 W
- 48, 120 V
- 600 rpm

### Aerogeneradores Enair (eje horizontal)

La empresa Enair es una nueva iniciativa empresarial que nace como el resultado de la evolución y la experiencia de David Bornay. Consciente de sus características decide evolucionar las máquinas actuales de pequeña potencia, participando activamente en el desarrollo una nueva gama de productos que supere todo lo existente en el mercado. Con esta perspectiva nació Enair, una ampliación empresarial de Bornay.

### **Enair 30**

- Alternador trifásico de imanes permanentes
- Imanes de neodimio
- 24 polos, 250 rpm
- 24 / 48 / 220 V
- 3 kW

### **Enair 70**

- Alternador trifásico de imanes permanentes
- Imanes de neodimio
- 24 polos, 250 rpm
- 24 / 48 / 220 V
- 5.5 kW

### **Enair 160**

- Alternador trifásico de imanes permanentes
- Imanes de neodimio
- 24 polos, 200 rpm
- 48 / 220 V
- 10.5 kW

#### Aerogeneradores Baiwind (eje vertical)

Baiwind S.L. se creó en Julio de 2009 para el desarrollo de un aerogenerador de eje vertical, llegando a un acuerdo de exclusividad con la empresa Enerlim, propietaria de la tecnología.

Dicha empresa son responsables del diseño y desarrollo de aerogeneradores de Eje Vertical con un rango de potencia de entre 300 W y 12 KW, para uso doméstico y comercial en lugares urbanos y áreas rurales.

#### **R6F1.5 / R6V3 / R12V7.5 / R24V11**

- Alternador trifásico asíncrono
- 4 polos
- 1500 rpm
- 220 / 380 V
- 1.5 kW / 3 kW / 5 kW / 7.5 kW / 11 kW

#### Aerogeneradores Anelion (eje horizontal)

#### **SW 3.5 GT**

- Alternador trifásico síncrono de imanes permanentes
- 100-370 rpm
- 400 V
- 3.5 kW

Como podemos observar en las distintas compañías comercializadoras, la gran mayoría utilizan generadores eléctricos síncronos, sin embargo no son muy comunes ver alternadores de flujo conmutado para dichas aplicaciones, ya que no están muy extendidos en la actualidad y siguen en desarrollo. Por lo tanto, los alternadores de flujo conmutado pueden ser una buena solución para aplicaciones de esta índole.

Normalmente, se utilizan alternadores con un elevado número de polos, esto permite reducir la velocidad de sincronismo, lo que significa producir energía eléctrica a bajas velocidades. Es necesario notarse que la excitación se realiza mediante imanes permanentes y no bobinas inductoras, casi siempre de neodimio, que presentan las mejores prestaciones en cuanto imanes se refiere. En el caso de los alternadores flujo conmutado, no es necesario tener un elevado número de polos. Esto se debe gracias a su estructura que permite trabajar a bajas velocidades de rotación generado a frecuencias aproximadamente industriales, es decir bajas frecuencias.

Otro aspecto a observar son las potencias de los generadores, que fluctúan entre 1 kW y 11 kW. Por ello, el diseño de nuestro alternador se encontrará en dicho nicho de mercado, una potencia de 6 kW trabajando a velocidades bajas, siendo síncrono con excitación de imanes de neodimio.

### 2.2.2. CAJA MULTIPLICADORA

Existen muy pocos aerogeneradores de pequeña potencia que dispongan de un generador asíncrono, pero los que hay disponen de cajas multiplicadoras. Estos trenes de engranajes, realizan la multiplicación de velocidades del rotor del molino (100-200 rpm) al eje del rotor (1000-1500 rpm) dependiendo de los polos del generador.

Normalmente son utilizados en generadores de inducción de mayor potencia, en aerogeneradores de mini-eólica no son comunes. Este tipo de elementos encarecen el precio del aerogenerador y reducen el rendimiento global del aerogenerador, por lo tanto se intenta de buscar un equilibrio entre el precio y el diseño del aerogenerador.

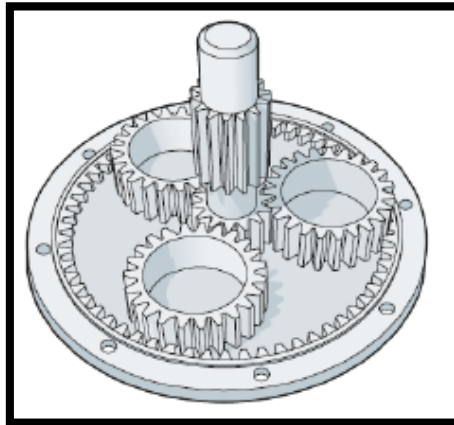


Figura 5: Tren de engranajes

### 2.2.3. ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Los convertidores electrónicos utilizados en los aerogeneradores son los responsables de transformar el valor de tensión, forma de onda y frecuencia de salida del generador para la posterior modificación y adaptación a la red eléctrica o las características establecidas del consumo.

Los convertidores disponen de un amplio rango de valores de tensión tanto de entrada como de salida, asimismo, trabajando a altos niveles de rendimiento 96% aproximadamente. Otra ventaja, es que permiten trabajar adaptando la curva de potencia del aerogenerador admitiendo así una cierta sobrecarga en función de las especificaciones de consumo. La mayoría de inversores disponen de capacidad de arranque suave. Disponen de cajas de protección frente sobretensiones y sobreintensidades de entrada asegurando la seguridad del sistema.

El uso de convertidores es necesario ya que hay que adaptar las variaciones de entrada de viento, lo que significa distintas velocidades del eje del rotor del generador, para la correcta generación de la energía eléctrica.

Los convertidores electrónicos que se utilizan:

- **Convertidor AC/ DC – DC/AC**

Rectifican la tensión alterna de salida del generador, convirtiéndola a continua. Dicho bus de continua, posteriormente, se ondula la tensión continua para ser transformada a tensión de salida sinusoidal determinada frecuencia y amplitud.

- **Convertidor AC/AC**

Modifican directamente la tensión de salida del alternador ondulando la tensión de salida del convertidor para adaptarla a la frecuencia y valor de tensión de la red o según las especificaciones de la instalación eléctrica.

## 2.2.4. REGULACIÓN DE LOS AEROGENERADORES

En la regulación de los aerogeneradores de pequeña potencia se puede distinguir entre la regulación de potencia cuando la velocidad del viento hace que el aerogenerador alcance su potencia nominal de salida y la regulación de velocidad cuando está operando a potencia parcial.

Normalmente, la regulación de potencia se consigue mediante el propio diseño de las palas o actuando de forma pasiva sobre el rotor.

Por lo tanto, se diferencian dos tipos de control:

- **Control ángulo de paso de las palas**

La orientación por medio de palas orientables es la más utilizada. Su funcionamiento consiste en actuar sobre el ángulo de paso de cada pala, ya que la fuerza aerodinámica que actúa sobre ella es función del ángulo, y que a la vez es función del ángulo de ataque y del paso de la pala. De esta forma se consigue variar la fuerza aerodinámica que actúa sobre la pala sin más que hacer que variar el ángulo de calaje, que se controla por procedimientos mecánicos relacionados con la velocidad de ataque del viento.

- **Control de la velocidad del rotor**

Para controlar el par en el alternador se emplean convertidores electrónicos que permiten funcionar al rotor del aerogenerador a velocidad variable manteniendo la frecuencia en la salida del alternador.

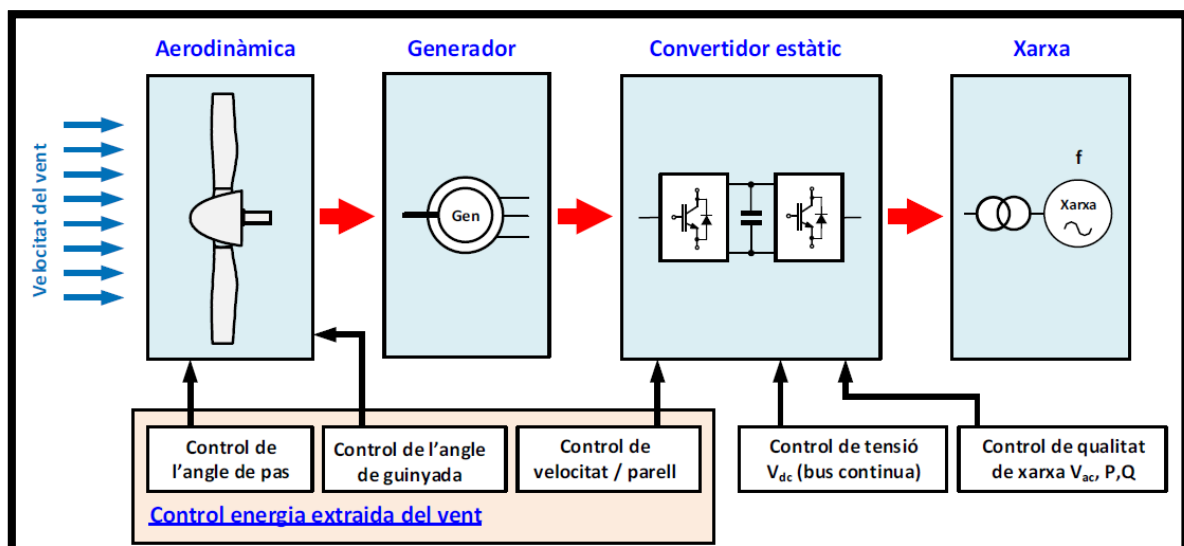


Figura 6: Diagrama de bloques control aerogenerador

Por lo tanto es necesario emplear un control sobre el aerogenerador en función de la velocidad del viento para poder llegar a extraer la máxima potencia.

Es necesario conocer la curva de potencia del aerogenerador. Esta determina la potencia extraíble del aerogenerador en función de la velocidad del viento. El objetivo principal es extraer la máxima potencia posible cuando el aerogenerador no trabaja a potencia nominal. Posteriormente, se trata de regular la potencia extraíble para mantenerla constante una vez ha alcanzado su potencia nominal aunque la velocidad del viento aumente.

Aquí podemos observar la curva de potencia de un aerogenerador y sus zonas características:

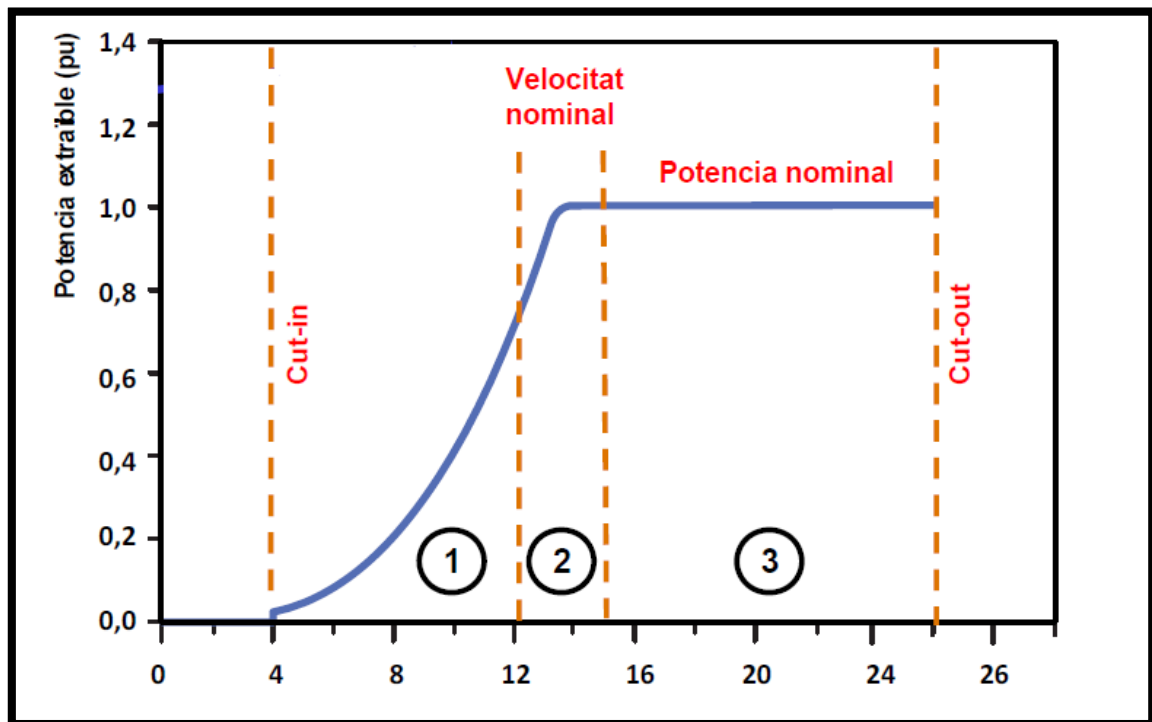


Figura 7: Curva de potencia de un aerogenerador

**1. Rango inferior de velocidades**

El objetivo es extraer la máxima potencia posible del viento. En estas condiciones trabaja a potencia parcial para llegar a obtener potencia nominal.

**2. Zona de transición**

El objetivo es mantener la potencia generada dentro de un rango seguro mediante el uso de control de velocidad sin cambiar el ángulo de paso de las palas. En dicha zona se alcanza la potencia nominal de generación o es muy próxima.

**3. Rango superior de velocidades**

El objetivo es mantener la velocidad de rotación del eje mediante el control del ángulo de paso de las palas. En estas condiciones se trabaja a plena carga.

### 2.2.5. CONFIGURACIONES DEL AEROGENERADOR

Existen diferentes configuraciones del sistema eléctrico del aerogenerador en función del tipo de generador empleado. Como ya se ha comentado anteriormente, en los aerogeneradores de pequeña potencia se evita utilizar cajas de engranajes, por lo tanto es muy común utilizar generadores síncronos, ya que simplifican y minimizan el coste.

Por lo tanto, estas son las configuraciones existentes:

#### Generador asíncrono con jaula de ardilla:

Se trata de un generador conectado directamente a red o a una batería de condensadores trabajando en modo aislado. Éste tipo de generador, solo puede trabajar en dicho estado superando la velocidad de sincronismo. Por lo tanto ha de ser desconectado de red en caso de no alcanzar la velocidad de sincronismo. Esta configuración precisa de caja de engranajes para alcanzar la velocidad de sincronismo.

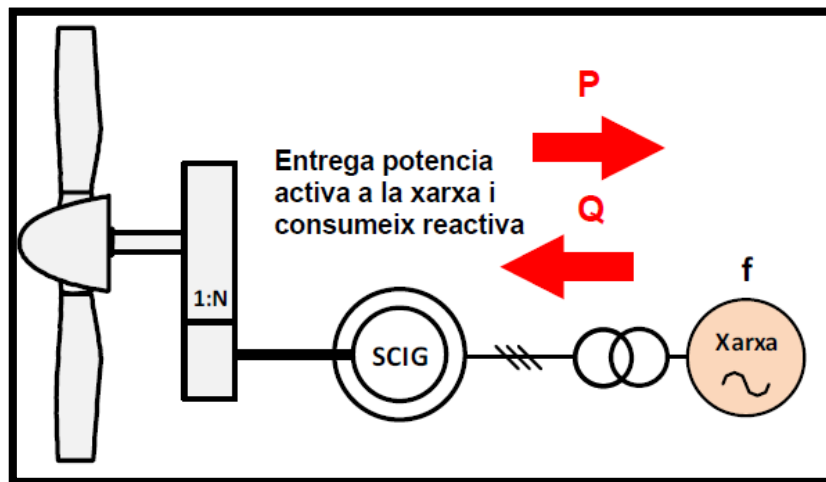


Figura 8: Configuración generador inducción

También existen otros tipos de configuraciones usando este tipo de generador. Estos son complementados con convertidores para asegurar la mayor calidad de generación eléctrica sin depender excesivamente de la velocidad de rotación.

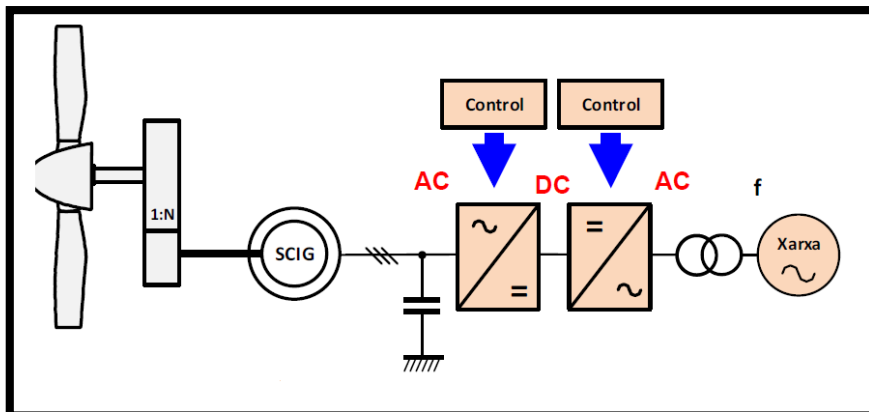


Figura 9: Configuración generador inducción con convertidores

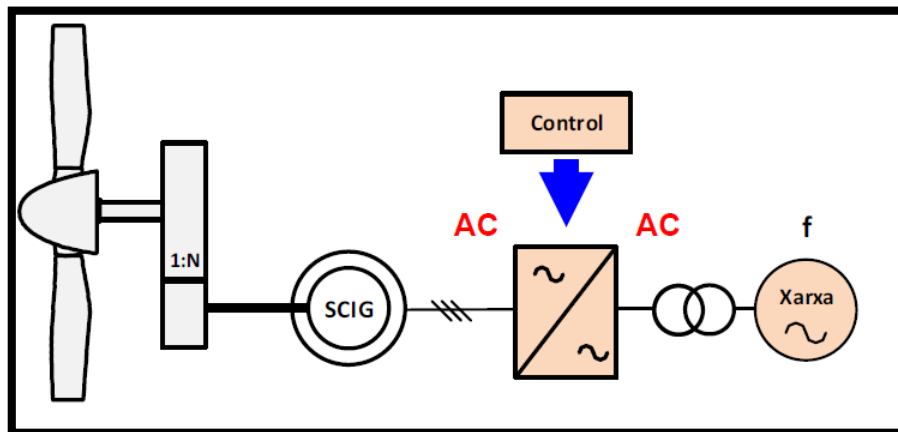


Figura 10: Configuración generador inducción con convertidores

### Generador síncrono

En estos casos se puede distinguir dos tipos de generadores, de imanes permanentes o de electroimanes.

En el caso de utilizar electroimanes, este tipo de accionamiento permite conectar de forma directa el alternador a red controlando la energía entregada a red según el control aplicado al electroimán. Otra posibilidad es utilizar convertidores electrónicos para rectificar la tensión de salida y posteriormente ondularla para inyectarla a red.

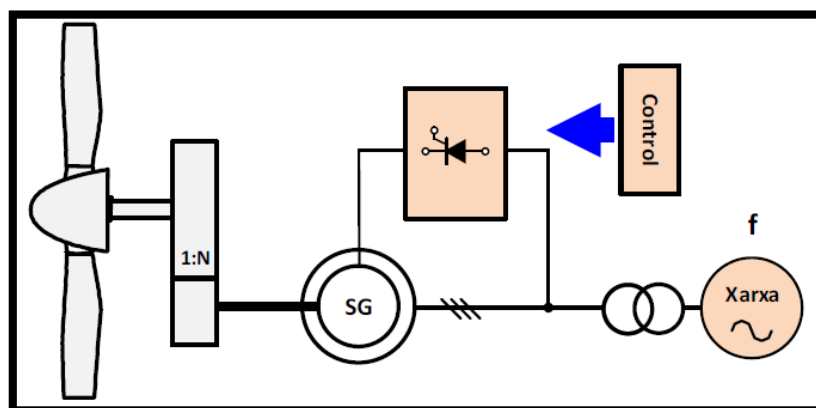


Figura 11: Configuración generador síncrono con electroimanes

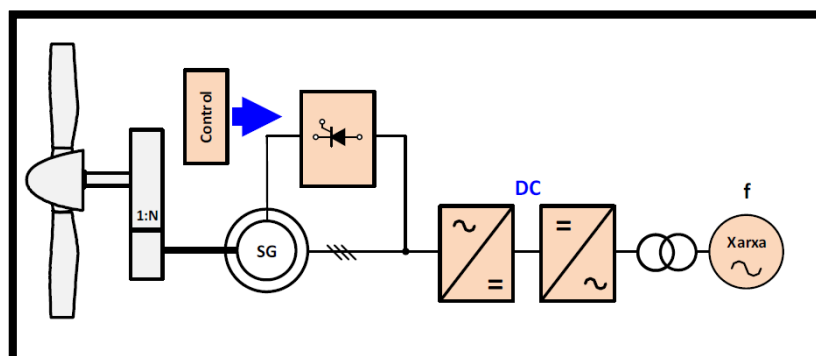


Figura 12: Configuración generador síncrono con electroimanes

Por otro lado, en el caso de utilizar alternadores síncronos de imanes permanentes, la frecuencia y tensión del estator de la máquina dependen de la velocidad de rotación del aerogenerador. Por lo tanto es necesario un convertidor AC/AC con bus de continua para poder conectar el generador a red trabajando a velocidad variable.

El convertidor ha de ser dimensionado para poder soportar la potencia generada por el alternador. El controlador permite controlar de forma independiente la potencia activa y reactiva entregada a red.

El diseño de éste tipo de generadores de imanes permanentes, suele ser con un gran número de polos, para poder disminuir la velocidad de sincronismo y poder operar sin necesidad de caja de engranajes y trabajar a frecuencia distinta de la red.

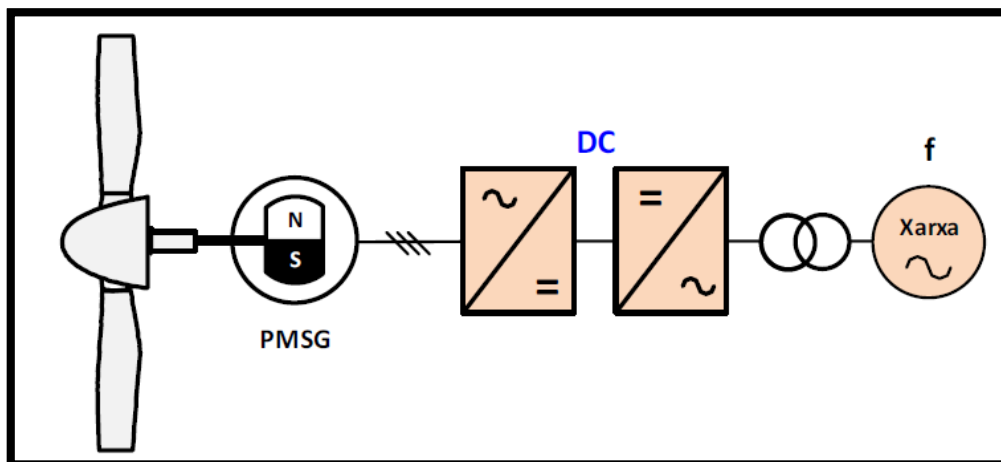


Figura 13: Configuración generador síncrono imanes permanentes

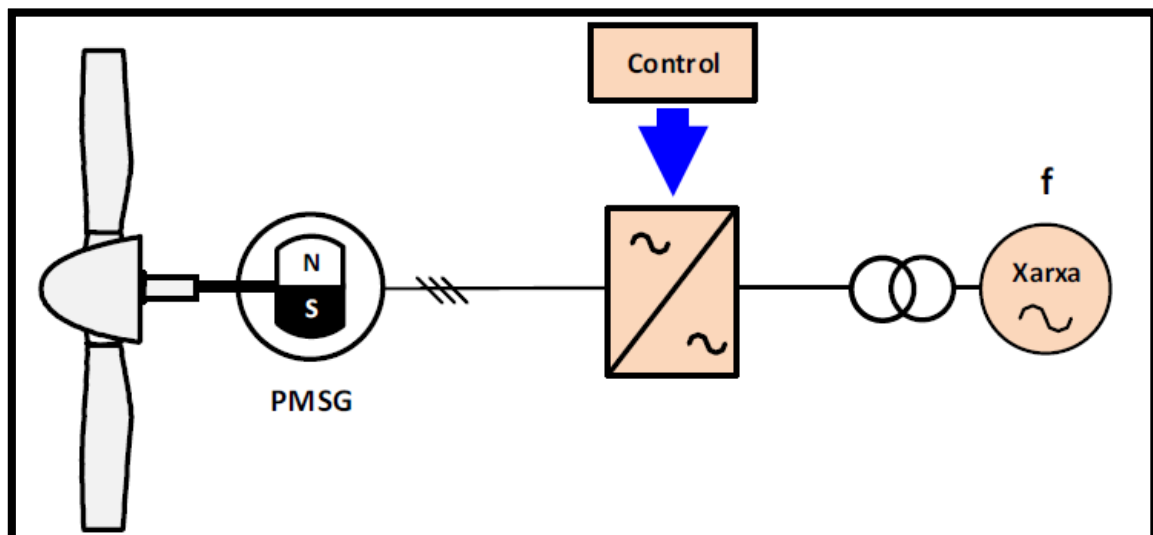


Figura 14: Configuración generador síncrono imanes permanentes



## **2.3 CONFIGURACIÓN PROPIA DEL AEROGENERADOR A DISEÑAR**

Una vez vista todas las posibilidades de las configuraciones estructurales de los aerogeneradores, a continuación se hablará de que diseño se pretende realizar y que diferencias existen respecto a otras configuraciones.

Primeramente, el diseño completo será a través de un accionamiento directo, lo que significa que el eje de la turbina está directamente acoplado al eje del alternador. Esto permite que no haya trenes de engranajes intermediarios. Por lo que en ese aspecto, aumentaremos ligeramente el rendimiento global del aerogenerador. Al no existir dichos intermediarios, evitamos pérdidas de energía producidas por el roce de los propios engranajes. Asimismo, evitamos posibles averías producidas en dichas zonas, ya que se trata de elementos sensibles que suelen traer problemas.

Por otro lado, hablando del propio alternador, la mayoría son síncronos excitados por imanes permanentes. En nuestro caso, se trata también de un alternador síncrono excitado por imanes permanentes. La diferencia es que no se trata de un alternador síncrono convencional, sino de una variante que presenta ciertas ventajas de diseño y técnicas respecto a los convencionales.

Seguidamente se explicará las bases de un alternador síncrono convencional y un alternador síncrono de flujo conmutado y se presentarán sus diferencias y ventajas entre ellos.

### **3. ALTERNADOR DE FLUJO CONMUTADO**

A continuación se dará paso a la explicación teórica del alternador de flujo conmutado, flux switching machine en inglés. Asimismo, explicando su principio de funcionamiento, sus características principales y los materiales empleados para su construcción y diseño.

#### **3.1 APLICACIONES PRINCIPALES**

Anteriormente, los alternadores de flujo conmutado fueron utilizados como alternadores monofásicos de alta frecuencia para aplicaciones aeroespaciales. Posteriormente, fueron investigados exhaustivamente para ser utilizados en accionamientos eléctricos. El interés en dichas máquinas, ha ido creciendo hasta el punto de ser comparados con las máquinas síncronas convencionales de imanes permanentes interiores y exteriores.

Actualmente, el uso de los alternadores de flujo conmutado se ha extendido en el mundo de la generación eólica. Estos, son utilizados en generación mini-eólica y en generación de alta potencia polifásica. Esto se debe a su simplicidad de diseño, que permite diseñar alternadores con altos números de polos salientes en el estator y dientes en el rotor. Permitiendo así crear alternadores polifásicos que puedan trabajar a bajas velocidades utilizando accionamientos directos, es decir, sin intermediarios mecánicos entre el eje de la turbina y el del alternador.

#### **3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

Un alternador de flujo conmutado es una máquina eléctrica síncrona. Su principio de funcionamiento está basado en la teoría de máquinas rotativas eléctricas convencionales. Son máquinas capaces de transformar la energía mecánica en energía eléctrica mediante la rotación del eje de la máquina. Sus principios electromagnéticos son los mismos que cualquier máquina eléctrica síncrona. Como novedad, ésta máquina es perfecta para la generación eléctrica ya que simplifica el diseño de máquinas y genera electricidad totalmente senoidal. Esto es debido a sus diferencias estructurales respecto a las máquinas síncronas tradicionales.

##### **3.2.1 ESTRUCTURA FÍSICA MÁQUINA SÍNCRONA CONVENCIONAL**

La máquina de flujo conmutado no es una máquina tradicional con una estructura típica de máquina síncrona.

La estructura típica de una máquina síncrona, está compuesta por un estator ranurado con un bobinado trifásico que completa el diseño del estator. Por otro lado, el rotor está conformado por una estructura circular o de polos salientes, dónde, quedan acoplados a dicha estructura la excitación inductora que genera el campo magnético. Ésta excitación puede ser creada mediante electroimanes donde circula corriente continua o simplemente por imanes permanentes. Dicha máquina puede trabajar como generador eléctrico o motor sin necesidad de aplicar controladores para su funcionamiento.

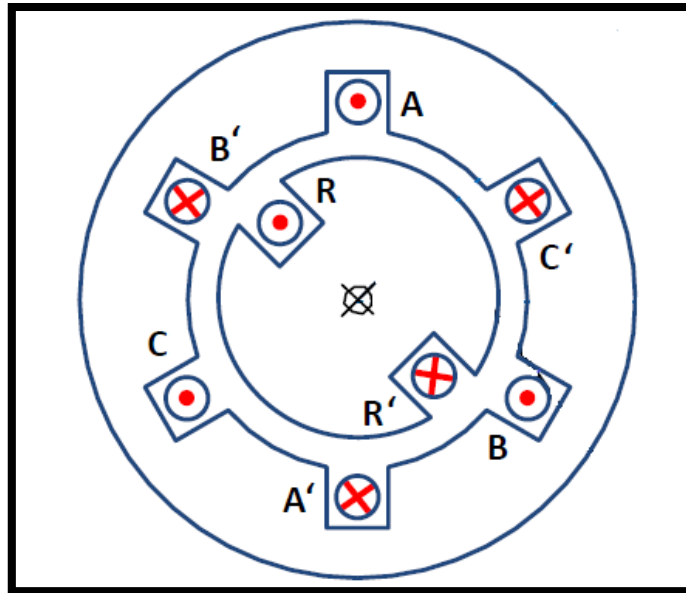


Figura 15: Estructura típica máquina síncrona de rotor cilíndrico

Como podemos observar en la figura 15, la estructura está compuesta por el estator ranurado, donde en su interior alberga los bobinados trifásicos que permitirían la creación de un campo magnético giratorio o permitiría ser inducido para crear una tensión en bornes de las terminaciones de cada fase.

Por otro lado, como se puede observar, el rotor es una estructura circular que permite la rotación dentro del estator. En dicha figura, se puede observar que la excitación inductora es creada por un electroimán, es decir, una bobina enrollada alrededor del material ferromagnético que crea un flujo magnético. No obstante, éste flujo inductor puede ser creado por un imán permanente acoplado a la estructura magnética.

El trabajo como motor o alternador de estas máquinas únicamente depende de si excitamos las fases de la máquina o hacemos girar el rotor..

Excitando la máquina con tensión alterna trifásica, se creará un campo magnético giratorio que girará a velocidad de sincronismo, que dicha velocidad dependerá de la frecuencia eléctrica de la alimentación. El rotor que también dispone de su propia excitación magnética, permite que ambos campos magnéticos creados por estator y rotor queden enganchados a través de sus polaridades opuestas. El giro físico del rotor se produce una vez enganchados ambos campos magnéticos, entonces, el propio rotor sigue la dirección de giro del campo magnético giratorio.

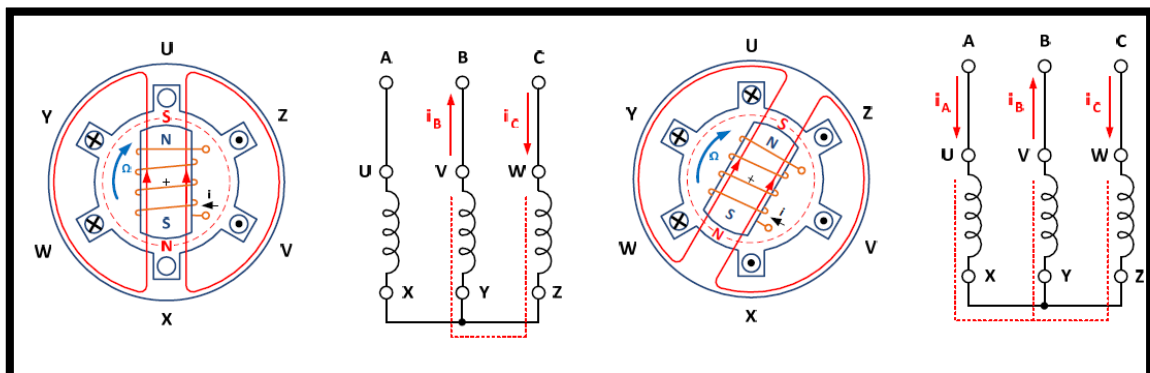


Figura 16: Campo magnético giratorio (instantes de tiempo)

Como vemos en la figura 16, podemos observar como el campo magnético giratorio (color rojo) se desplaza hacia la derecha. Asimismo, vemos como la polaridad del rotor queda fijada en la del campo giratorio.

El trabajo como generador solo dependerá de la velocidad de giro del rotor. Al girar el rotor, siendo excitado y creando su propio campo magnético constante, se generará una fuerza electromotriz inducida en las fases de la máquina que variará de forma sinodal de frecuencia determinada por el número de polos de la máquina.

$$[1] \quad n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

### 3.2.2 ESTRUCTURA FÍSICA MÁQUINA DE FLUJO CONMUTADO

Una máquina de flujo conmutado, sigue los mismos principios electromagnéticos que una máquina síncrona convencional, pero difiere en su estructura física.

El estator está conformado por polos salientes, contrariamente al visto anteriormente que está formado por ranuras en el propio estator. En los polos salientes se enrollan los bobinados que conforman las fases de la máquina, siendo monofásico o polifásico. Además, en dichos polos, existe una ranura situada en el centro del polo saliente donde en su interior alberga un imán permanente que realiza la excitación de la máquina. Los imanes están magnetizados tangencialmente al perímetro de la circunferencia del estator, todo esto para crear concentración de flujo y guiar el flujo magnético que circulará por las bobinas de las fases. Por lo tanto, en este caso, los imanes no están dispuestos en el rotor, sino en el estator de la máquina.

El caso del rotor, es mucho más simple. En el caso anterior, el rotor tiene un diseño complejo debido a que alberga ahí los imanes. En el caso de una máquina de flujo conmutado, el rotor es simplemente una pieza ferromagnética circular dentada. Esto significa que reduce la dificultad de diseño de la máquina. La peculiaridad de esta máquina es que el número de dientes del rotor es igual al número de par de polos de la máquina.

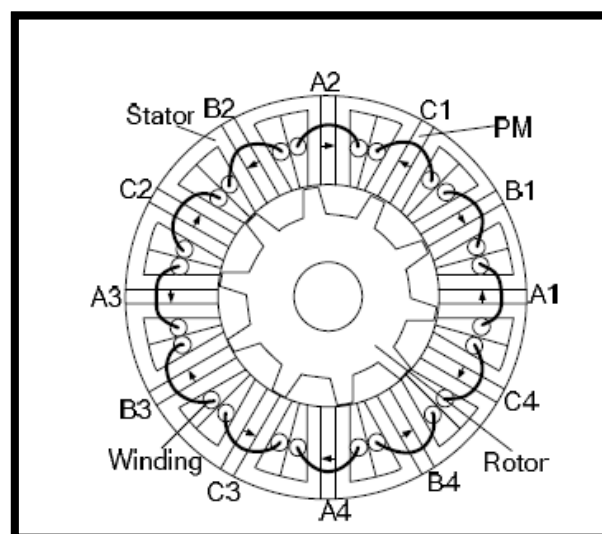


Figura 17: Estructura máquina de flujo conmutado

Como podemos observar en la figura 17, vemos como los bobinados están enrollados alrededor de los polos saliente, comentado anteriormente. También vemos como las bobinas de cada fase son diametralmente opuestas. Cada fase ocupará cuatro polos salientes, ya que este ejemplo se trata de un alternador de flujo conmutado 12/10, es decir, 12 polos salientes y 10 dientes que conforman el rotor. Además, los imanes contiguos están enfrentados entre sí en cuanto a polaridad se refiere, para conseguir la concentración de flujo y poder guiar las líneas de flujo. También se puede observar la forma del rotor, como es simplemente una pieza ferromagnética tallada con dientes salidos.

Evidentemente, para que la máquina funcione como generador y motor existe una relación entre número de polos salientes, el número de dientes del rotor y la frecuencia de generación. Esta relación viene dada por la siguiente expresión:

$$[2] \quad Q_s = m \cdot 2 \cdot k \quad ; \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

$$[3] \quad Q_R = Q_s \pm 2$$

$$[4] \quad p = Q_R$$

$$[5] \quad f_e = \frac{n \cdot Q_R}{60}$$

Como vemos en las expresiones [2], [3], [4] y [5], existe una relación entre el número de fases de la máquina, el número de polos salientes del estator y el número de dientes en el rotor. Asimismo, analizando la expresión de la frecuencia, observamos que diseñando un alternador de 10 dientes en el rotor y haciendo trabajar a altas velocidades, llegamos a generar a alta frecuencia. Contrariamente, trabajando a bajas velocidades, generaría a bajas frecuencias, más próximas a las industriales. Esto le hace perfecto para generación mini-eólica ya que suelen trabajar a bajas velocidades, utilizando accionamientos directo y por lo tanto abaratando mantenimiento y coste del aerogenerador final.

### 3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO COMO GENERADOR ELÉCTRICO

Las máquinas eléctricas convencionales rotativas tiene la peculiaridad que pueden trabajar como motor o como generador. En éste caso, una máquina de flujo conmutado puede trabajar como generador sin ningún tipo de problemas, pero en caso de trabajar como motor es necesario aplicar técnicas de control y el uso de convertidores electrónicos para trabajar como tal. Por ello, el principio de funcionamiento como motor se omitirá ya que no es objeto del proyecto. Únicamente se estudiará su funcionamiento como generador eléctrico, debido a su única aplicación en éste proyecto.

No existe ningún requisito para que un alternador de flujo conmutado genere electricidad. Simplemente con la rotación y el movimiento de los dientes del rotor, se generan fuerzas electromotrices inducidas en los bobinados de las fases. Simplemente que la frecuencia de la onda generada y la amplitud de ésta, dependerá de la velocidad de giro del rotor. Visto en la expresión [5], la cual depende de la velocidad de rotación de la máquina. También la amplitud de la onda generada, ya que dependerá de la frecuencia angular eléctrica y del flujo concatenado que se mantendrá constante independientemente de la velocidad de rotación.

Cuando el rotor se mueve, las líneas de flujo que circulan por el estator y rotor son alternativamente guiadas de forma positiva y negativa y de mayor concatenación de flujo a menor concatenación de flujo por el circuito magnético. Dichas líneas de flujo circulan por donde se sitúan las bobinas enrolladas en el exterior del polo saliente. Esto significa que las líneas de flujo que circulan por el interior de una fase, lo hagan incrementándose y disminuyendo en valor eficaz de flujo y de forma bidireccional. Esta característica de la máquina permite que la forma de onda del flujo concatenado sea totalmente senoidal, y por consiguiente, la tensión inducida en bornes y la intensidad también lo sean.

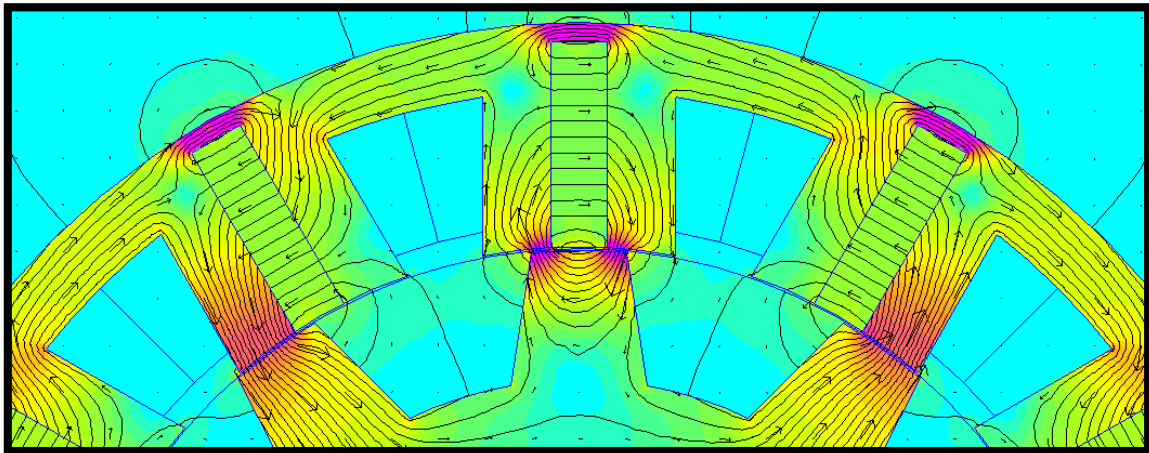


Figura 18: Líneas de flujo

Como podemos ver en la figura 18, vemos como circulan las líneas de flujo por los polos salientes del estator. Por ejemplo en el polo saliente izquierdo, vemos como el flujo magnético circula en sentido directo al rotor, guiado por el imán permanente de dicho polo en cuestión. En el polo central, el flujo concatenado resultante es cero, ya que las líneas de flujo circulan en direcciones opuestas, es decir, en un lateral del polo circulan en dirección al exterior, en cambio en el otro lateral circulan en dirección al rotor de la máquina. En el polo saliente derecho, las líneas de flujo circulan en dirección radial hacia el exterior de la máquina. Si seguimos girando el rotor, estas líneas de flujo circularán de forma distinta. A medida que el rotor va girando, el sentido de las líneas de flujo irán variando progresivamente.

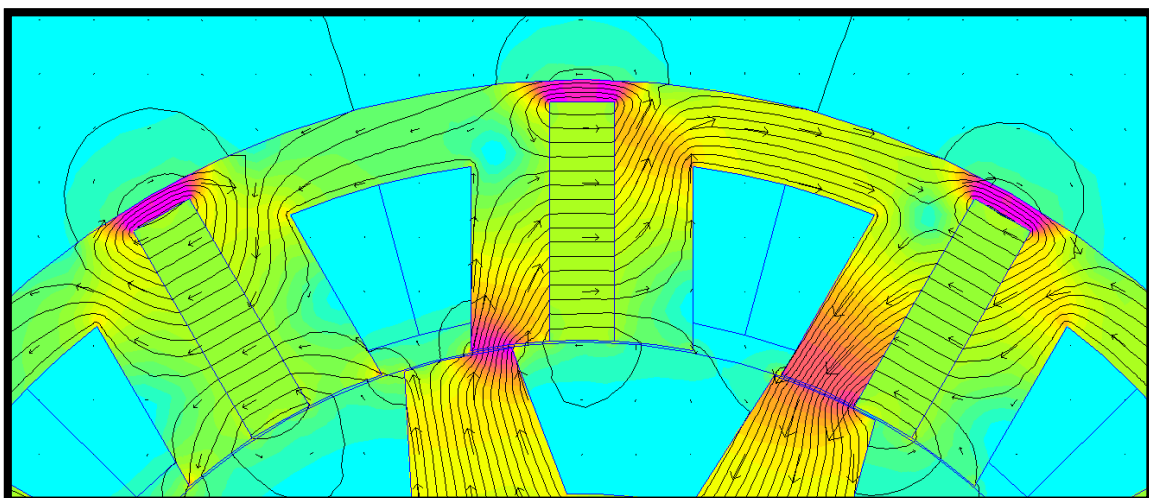


Figura 19: Líneas de flujo

Como podemos ver en la figura 19, en el polo saliente izquierdo el valor del flujo concatenado es cero, ya que las líneas circulan en sentidos opuestos, por lo tanto ha pasado de tener un cierto flujo concatenado resultante a ser cero en esta ocasión. En el polo saliente central, ha pasado de ser cero el flujo concatenado resultante a circular en dirección radial hacia el exterior. Eso significa que de valer cero, se ha ido incrementando. Finalmente en el polo saliente de la derecha, el sentido de las líneas de flujo se ha invertido. Eso significa que ha pasado de un valor del flujo concatenado positivo a un valor negativo o al revés.

Gracias a esta circulación de las líneas de flujo, la forma de onda del flujo concatenado que se obtiene es la siguiente:

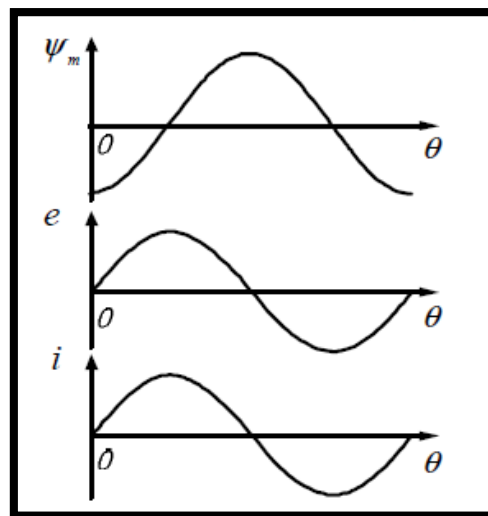


Figura 20: Formas de onda de flujo concatenado, F.E.M inducida e intensidad en función del ángulo

Sabiendo que la forma de onda es senoidal, y a través de las leyes de Faraday- Lentz, podemos encontrar la expresión de la tensión inducida en las fases de la máquina:

$$[6] \quad \psi = \hat{\psi} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$[7] \quad e = \frac{d\psi}{dt}$$

$$[8] \quad e = -\hat{e} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Obtenemos una tensión totalmente senoidal. Por lo tanto, para aplicaciones de generación es perfecto, produciendo energía eléctrica totalmente senoidal eligiendo la frecuencia de generación y el valor de la tensión en función de la velocidad de rotación. Esto le da una gran versatilidad en cuanto aplicaciones se refiere.

### **3.4 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Como cualquier diseño de máquinas eléctricas, los diseños están basados según conocimientos empíricos. A parte de sus fundamentos electromagnéticos, las mejoras y variaciones con el paso del tiempo han ido mejorando el diseño de las máquinas. Por ello, el diseño de las máquinas eléctricas se basa en ecuaciones paramétricas, las cuales definen las dimensiones de la máquina según sus características técnicas.

Por lo tanto, es necesario saber los parámetros conocidos de las máquinas de flujo conmutado, basado en la experiencia de diseños anteriores. Estas máquinas llegan a haber inducciones en el entrehierro de valores altos, aproximadamente de 2 T. Otro aspecto importante en una máquina es la densidad de corriente, en este caso puede ser entre 5 y 7 A/mm<sup>2</sup>. Preferiblemente, se prefiere densidades de corrientes menores, obteniendo menos pérdidas y donde la máquina trabaja menos cargada. Otro aspecto de importancia, es la carga lineal específica, que representa la intensidad por unidad de longitud radial de la máquina. Los valores de la carga lineal específica varían entre 2500 y 2800 A/m.

Básicamente estos son los parámetros que hay que tener en cuenta para obtener las dimensiones de la máquina y la potencia esperada de ésta. Evidentemente, no son los únicos parámetros que influyen en el diseño, pero muchos de ellos se tratan de factores relacionados con las dimensiones de la máquina. Hay que tener en cuenta tres factores importantes. El primer factor, se trata de la relación entre el diámetro interior del estator y el diámetro exterior del estator. El segundo factor a tener en cuenta se trata del ratio entre la anchura del diente del rotor respecto al paso de ranura del estator. Finalmente otro factor a tener en cuenta es el factor de flujo de dispersión, que tiene en cuenta dichas pérdidas de flujo magnético.

### **3.5 MATERIALES DE LA MÁQUINA**

En el diseño de máquinas es de vital importancia elegir los materiales adecuados para cada máquina. Con esto, obtendremos el diseño de una máquina de altas prestaciones y de mayor calidad. Hay que tener en cuenta que debe existir una relación calidad/precio de la máquina, sin llegar a que los costes del alternador sean inalcanzables.

#### **3.4.1. MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS**

Los materiales magnéticos blandos se utilizan para la construcción de los núcleos de las máquinas eléctricas rotativas y estáticas. Por ello, estos materiales han de tener una baja permeabilidad, han de tolerar inducciones de saturación altas y que tengan bajas pérdidas. Todas éstas serían las características más importantes en el momento de elegir el núcleo de la máquina. Evidentemente, cuantas más prestaciones técnicas tenga el núcleo, de mayor coste será el alternador.

La aleación de hierro y silicio para aplicaciones electrotécnicas se conoce como chapa magnética. La chapa magnética se obtiene por laminación y se presenta en chapas de pequeño grosor. Dicha chapa puede ser anisótropa o isótropa. En las chapas isótropas las características magnéticas no varían según la dirección, en cambio, la anisotropía las características varían en función de la dirección de laminación. En el diseño de máquinas eléctricas hace falta conocer la curva de inducción y de pérdidas específicas en función de la inducción magnética para una frecuencia determinada.



Existen una gran variedad de chapas magnéticas, todas ellas con diferentes características técnicas. La denominación de la chapa magnética nos da una idea de las características de ésta y de su calidad como tal. La denominación se hace de la siguiente manera:

$$M(\text{pérdidas específicas a } 50 \text{ Hz } B = 1,5T) \times 100 - (\text{grosor mm}) \times 100$$

Con lo cual, nos da una idea de sus pérdidas en el hierro de la chapa a una frecuencia de 50 Hz y el grosor de la chapa. De ésta forma, al tener menos pérdidas, podemos decir que la chapa es de mayor calidad y acepta inducciones de saturación mayores.

IEC 404-8-4 (1986)	EN 10106 (1995)	AISI	ASTM A677 (1989)	JIS 2552 (1986)	GOST 21427 0-75
-	M235-50A	-	-	-	-
250-35-A5	M250-35A	M 15	36F145	35A250	2413
270-35-A5	M270-35A	M 19	36F158	35A270	2412
300-35-A5	M300-35A	M 22	36F168	35A300	2411
330-35-A5	M330-35A	M 36	36F190	-	-
-	M250-50A	-	-	-	-
270-50-A5	M270-50A	-	-	50A270	-
290-50-A5	M290-50A	M 15	47F168	50A290	2413
310-50-A5	M310-50A	M 19	47F174	50A310	2412
330-50-A5	M330-50A	M 27	47F190	-	-
350-50-A5	M350-50A	M 36	47F205	50A350	2411
400-50-A5	M400-50A	M 43	47F230	50A400	2312
470-50-A5	M470-50A	-	47F280	50A470	2311
530-50-A5	M530-50A	M 45	47F305	-	2212
600-50-A5	M600-50A	-	-	50A600	2112
700-50-A5	M700-50A	M 47	47F400	50A700	-
800-50-A5	M800-50A	-	47F450	50A800	2111
-	M940-50A	-	-	-	-
-	M310-65A	-	-	-	-
-	M330-65A	-	-	-	-
350-65-A5	M350-65A	M 19	64F208	-	-
400-65-A5	M400-65A	M 27	64F225	-	-
470-65-A5	M470-65A	M 43	64F270	-	-
530-65-A5	M530-65A	-	-	-	2312
600-65-A5	M600-65A	M 45	64F360	-	2212
700-65-A5	M700-65A	-	64F400	-	2211
800-65-A5	M800-65A	-	-	65A800	2112
-	-	M 47	64F500	-	-
1000-65-A5	M1000-65A	-	64F550	65A1000	-

Figura 21: Equivalencia chapas ferromagnéticas normalizadas

A continuación se muestra la curva de inducción del núcleo magnético a utilizar. Según el diseño de generadores de flujo conmutado, los valores de inducción suelen ser altos, entorno 2 T. Esto, hace que el material a utilizar deba de tener una alta inducción de saturación.

Para ello se ha utilizado la chapa tipo M270-35A equivalente a la denominación estadounidense M-19.

Aquí se presenta su curva de magnetización, que relaciona la inducción en el material en función de la intensidad del campo magnético aplicado sobre el material.

### Curva de magnetización M270-35A

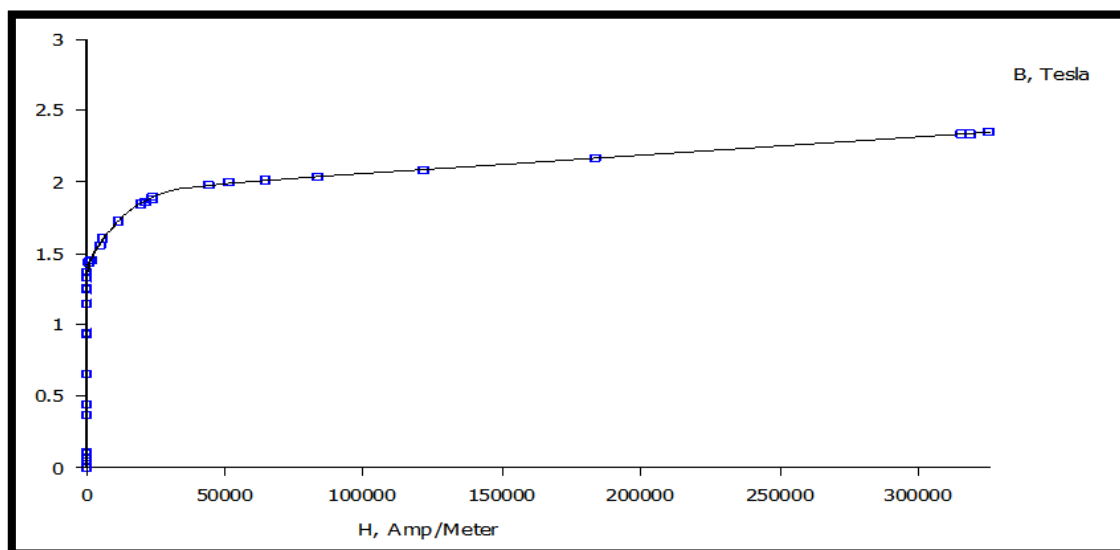


Figura 22: Curva magnetización M270-35A

Como podemos observar en la figura 21, vemos como el codo de saturación del material ferromagnético se sitúa aproximadamente en torno al valor de las 2 T. Por lo tanto, la elección de este material es apropiado ya que las inducciones de una máquina de flujo conmutado se sitúan en estos valores. Esto hará que la máquina no se sature magnéticamente.

La elección de dicha chapa es a través de la empresa “Cogent”, donde se anexará su catálogo en el cual se encuentran las características del material elegido.

Por ello, es importante conocer sus características magnéticas y físicas, las cuales son las siguientes: las cuales son las siguientes:

Pérdidas específicas a B=1,5 T a 50 Hz	Densidad	Mínima polarización magnética a 50 Hz		
		H=2500 A/m	H=5000 A/m	H=10000 A/m
2,7 W/kg	7.65 kg/dm <sup>3</sup>			
	7650 kg/m <sup>3</sup>	1,49 T	1,6 T	1,7 T

Tabla 1: Características chapa magnética M270-35A

### 3.4.2. MATERIALES FERROMAGNÉTICOS DUROS

Los materiales magnéticos duros, imanes permanentes, son materiales que continúan ejerciendo un campo magnético mucho después de haber sido sometidos a la acción de un campo magnético.

En la siguiente figura 23, se muestra cuando un imán es magnetizado. El valor de la intensidad de campo magnético se incrementa siguiendo la curva de inducción hasta que el material se satura. Si ahora la intensidad de campo magnético se reduce, llega a un punto,  $B_r$ , donde ésta se hace cero, llamado inducción remanente. Si ahora invertimos el sentido de la intensidad de campo magnético, llega un momento en que la inducción se hace cero y la intensidad de campo magnético se llama campo coercitivo. Si seguimos disminuyendo la intensidad del campo magnético se llegará a la saturación, pero en éste caso en sentido negativo. Si se volviese a invertir el sentido completariamos el ciclo de histéresis intrínseco del imán. La permeabilidad magnética de los imanes es muy próxima a los valores del aire.

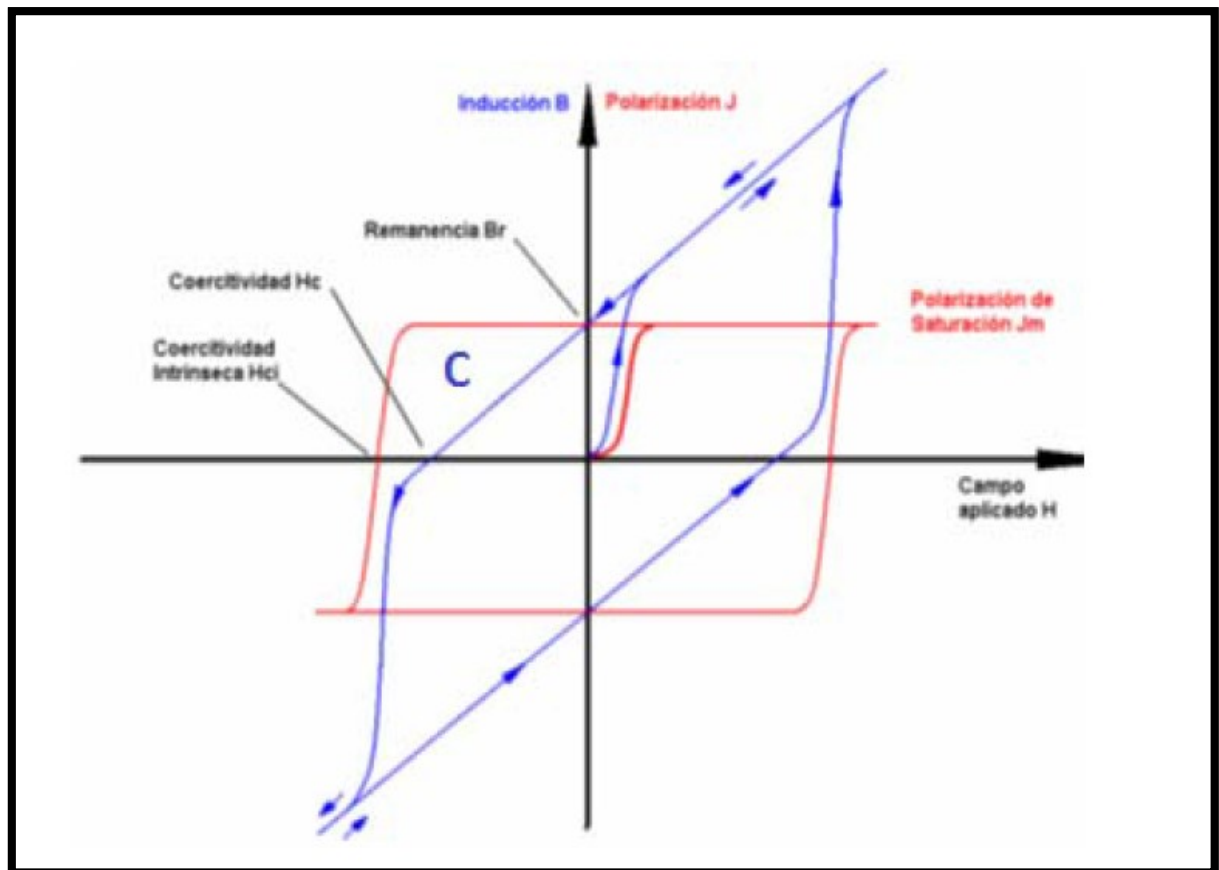


Figura 23: Ciclo de histéresis intrínseco y extrínseco

Trabajar con imanes permanentes, significa trabajar en el segundo cuadrante del ciclo de histéresis, es decir en la curva de desmagnetización. Por lo tanto hay que tener en cuenta dos zonas, la inducción remanente y el campo coercitivo. Estos serán los dos puntos que delimiten la zona de trabajo del propio imán permanente. En algunos casos, se puede llegar a desmagnetizar el imán si el campo magnético aplicado es muy grande, por lo tanto hay que tener en cuenta estas características y hacer una buena elección del imán.

Por lo tanto en el diseño de un alternador de flujo conmutado si la excitación se realiza mediante imanes permanentes, hay que elegir bien el tipo de imán que se utilizará. Existen varios diseños de dichos alternadores con imanes de ferritas, estos presentan bajas inducciones remanentes y campos coercitivos bajos. Por lo tanto para realizar un diseño de un generador de una determinada potencia con tales imanes, necesitaríamos mayores volúmenes de material ferromagnético. En nuestro caso, nos interesa minimizar el volumen de la máquina, por lo tanto es necesario utilizar imanes permanentes de elevadas prestaciones que nos permita reducir el diámetro y la longitud de la máquina para obtener una determinada potencia.

En nuestro caso, se ha optado por la elección de un imán de neodimio hierro y boro, conocido como imán de NdFeB, presentan las mejores prestaciones respecto los demás. Presentan las mayores inducciones remanentes y los mayores campos coercitivos.

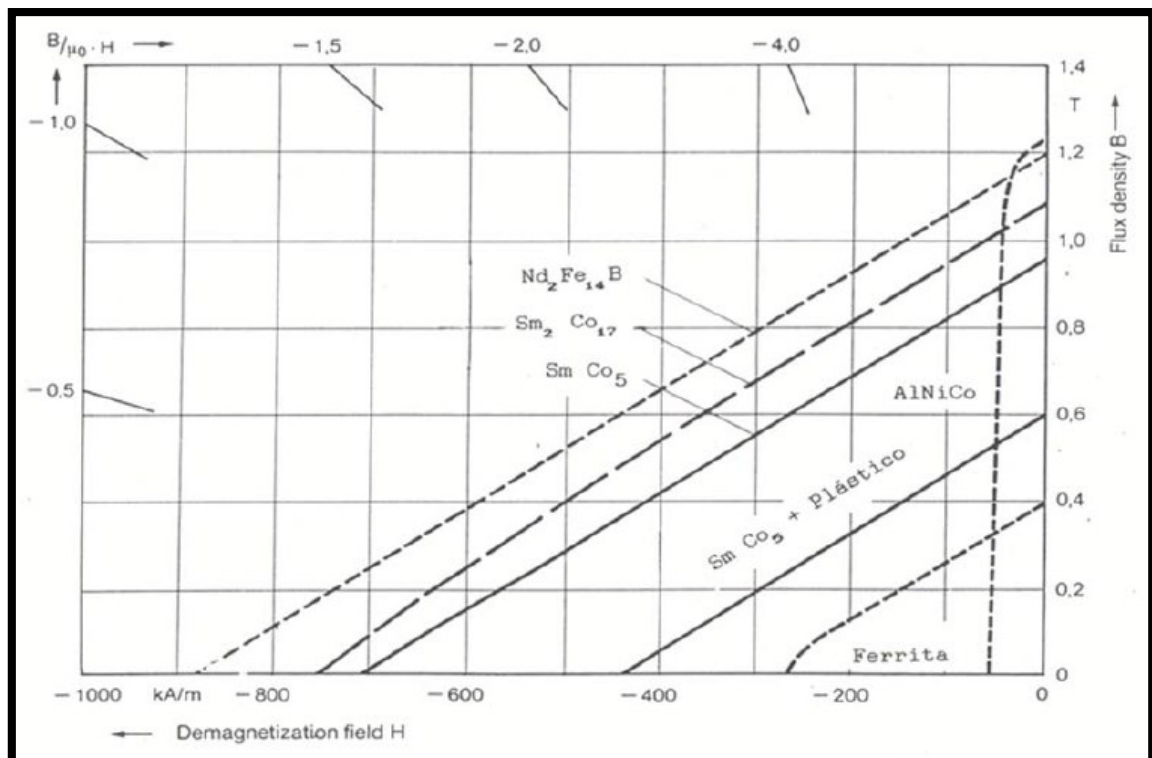


Figura 24: Diferentes imanes con sus respectivas curvas de desmagnetización

Como podemos observar en la figura 24, vemos las diferencias entre los distintos tipos de imanes que existen. Algunos de ellos, sus características son muy similares, pero no solo las características magnéticas son importantes, sino también las térmicas. Los imanes permanentes son sensibles a la temperatura, y por ello, al aumentar la temperatura pierden capacidades y disminuye la inducción remanente y el campo coercitivo.

A continuación se muestra los diferentes imanes con sus componentes y características.

<b><i>NdFeB</i></b>  <b>-Alta Br, Alta Hc</b> <b>-Producto BH más elevado</b> <b>-Sensible a la temperatura</b> <b>-Necesidad de recubrimiento anti-corrosivo</b>	<b><i>SmCo</i></b>  <b>-Alta Br, Alta Hc</b> <b>- Elevada temperatura de operación</b> <b>- Producto BH elevado</b> <b>-Poco sensibles a la temperatura</b> <b>- Producto muy caro</b>
<b><i>AlNiCo</i></b>  <b>-Alta Br, Bajo Hc</b> <b>- Temperatura elevada de operación</b> <b>- Muy sensible a campos desmagnetizantes</b>	<b><i>Ferritas</i></b>  <b>-Br moderado, Alto Hc</b> <b>-Económicos</b> <b>- Sensibles a la temperatura</b>

Tabla 2: Comparativa características imanes

### Curva desmagnetización imán NdFeB 32

El imán elegido es un Vacodym 667 HR, producto de la empresa “VacuumSchmelze” es un imán de NdFeB.

<b>Inducción remanente Br (T)</b>	<b>Campo coercitivo Hc (kA/m)</b>	<b>Densidad de energía BH (kJ/m3)</b>	<b>Coeficiente de temperatura Br 20-150°C (%/°C)</b>	<b>Coeficiente de temperatura Hc 20-150°C (%/°C)</b>
<b>1,18</b>	<b>915</b>	<b>270</b>	<b>-0,085</b>	<b>-0,55</b>

Tabla 3: Características magnéticas Vacodym 667 HR

<b>T° Curie (°C)</b>	<b>Resistencia eléctrica (<math>\Omega</math>mm2/m)</b>	<b>Calor específico J/(kg·K)</b>	<b>Módulo de Young (kN/mm2)</b>	<b>Fuerza de doblado (N/mm2)</b>	<b>Fuerza compresiva (N/mm2)</b>	<b>Densidad (g/cm3)</b>
<b>310- 370</b>	<b>1,1-1,7</b>	<b>350-500</b>	<b>140-170</b>	<b>120-400</b>	<b>600-1250</b>	<b>7.6 g/cm3</b>

Tabla 4: Características físicas Vacodym 667 HR

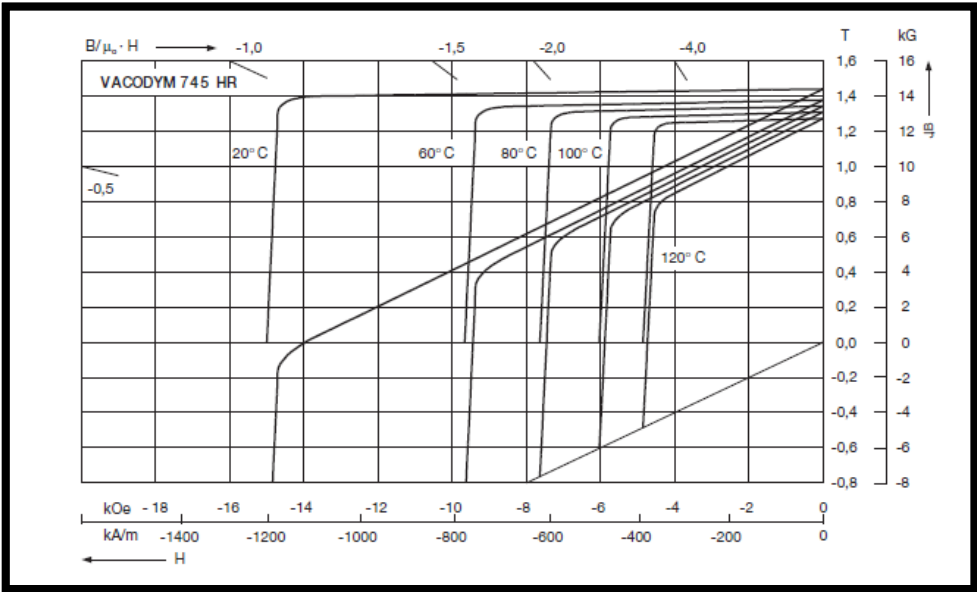


Figura 25: Curva desmagnetización Vacodym 667 HR a diferentes temperaturas

En la figura 25, podemos observar la curva de desmagnetización del imán permanente escogido. Vemos, como la curva varía, disminuyendo la inducción remanente y el campo coercitivo a medida que aumenta la temperatura de trabajo del imán.

3.4.3. MATERIALES CONDUCTORES

Los materiales conductores son utilizados en el diseño y construcción de máquinas y elementos eléctricos. Dichos elementos son la base principal para la construcción ya que si ellos no sería posible la realización de las máquinas. Para ello, han de tener una baja resistividad eléctrica, asimismo, unas ciertas prestaciones mecánicas que permitan su manipulación, mecanización y su uso. Los materiales más utilizados en la industria para el uso de conductores son el aluminio y el cobre.

El uso para conductores en la máquina a diseñar será de cobre.

Propiedades	Cu
Conductividad (S·m/mm²)	58
Densidad a 20°C (g/cm³)	8,96
Resistencia a la tracción (kg/mm²)	20
Punto fusión (°C)	1083

Tabla 5: Características técnicas del cobre

La elección del conductor esmaltado para la realización del bobinado será a través de la empresa IMSA, siendo el producto “Edflex 200”, de clase térmica 200°C, con un recubrimiento de poliesterimida y sobre capa de amida imida. Dependiendo del tipo de diseño del bobinado de las fases, es posible que se necesite conductores en paralelo en el propio conductor de bobinado. Todo esto será especificado en el diseño de las bobinas.

## 4. DISEÑO ALTERNADOR FLUJO CONMUTADO

En este apartado daremos paso al diseño íntegro del alternador de flujo conmutado. El proceso de diseño comenzará estudiando las características técnicas del aerogenerador a utilizar, pasando por el dimensionamiento de la máquina, finalizando por las simulaciones y por la obtención de parámetros de la máquina.

### 4.1 ECUACIONES PARAMÉTRICAS

Como se ha comentado anteriormente, el diseño de las máquinas eléctricas están basadas en conocimientos empíricos y en conocimientos de electromagnetismo. Por lo tanto, cada diseño de cada tipo de máquina tiene sus propias ecuaciones paramétricas.

Seguidamente presentamos las ecuaciones necesarias para obtener el dimensionamiento del alternador de flujo conmutado.

$$[9] \quad D_{s,i}^2 \cdot l = \frac{4 \cdot Q_S \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot Q_R \cdot k_d \cdot c_S \cdot A_c \cdot \hat{B}_\delta}$$

$$[10] \quad E_{Fase} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot N_{ph} \cdot \frac{Q_R}{Q_S} \cdot k_d \cdot c_S \cdot \hat{B}_\delta \cdot D_{s,i} \cdot l \cdot \omega$$

[9]-Esta expresión determina el diámetro interior del estator y la longitud del alternador. Los parámetros que influyen en dichas dimensiones son el par del alternador, el número de polos salientes del estator, el número de dientes del rotor, la inducción en el entrehierro, la carga lineal específica, el factor de dispersión de flujo magnético y finalmente el ratio de anchura del diente del rotor con el paso de ranura del estator.

[10]-Esta expresión determina también el diámetro interior del estator y su longitud. Los parámetros que influyen en las dimensiones esta vez son distintos parcialmente. Los factores de flujo y el ratio de anchura siguen siendo los mismos. Asimismo, aparecen nuevos parámetros como son la fuerza electromotriz inducida por fase, el número de espiras por fase y la velocidad angular del rotor.

Por lo tanto, aplicando los términos adecuados, ya explicados en el apartado de características técnicas, es posible determinar el diámetro interior del estator y su longitud. Estos dos parámetros determinarán la potencia y el par de la máquina principalmente.

### 4.2 DIMENSIONES DEL ALTERNADOR DE FLUJO CONMUTADO

Existe una relación entre las dimensiones de los polos del estator, la anchura de los dientes del rotor dependiendo del diámetro interior del estator y el número de polos salientes del estator. Por lo tanto, una vez obtenido el diámetro de la máquina, ya podremos obtener las dimensiones de todas las partes del alternador.

Las relaciones en este caso dependen de una expresión que involucra el paso de ranura del estator, las relaciones dimensionales son las siguientes:



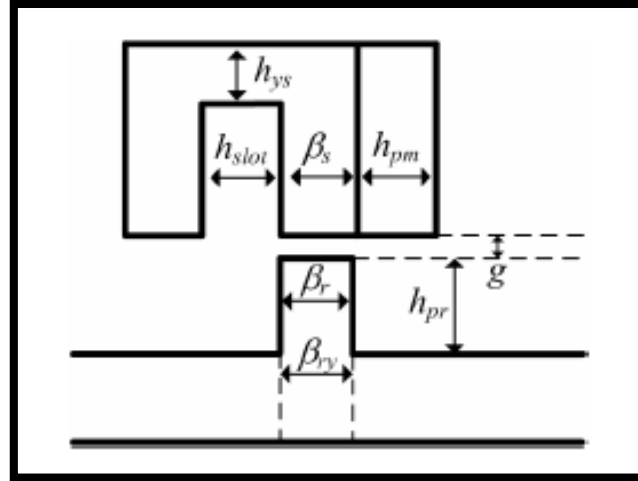


Figura 26: Relación de dimensiones

$$\tau_s = \frac{\pi D_{s,i}}{Q_s}$$

$$h_{ys} = h_{slot} = \beta_s = \frac{\tau_s}{4}$$

$$h_{pm} = \frac{\tau_s}{5}$$

$$\beta_r = 1,4 \cdot \beta_s$$

$$\beta_{ry} = 2,8 \cdot \beta_s$$

$$h_{pr} = \frac{1}{8} \cdot (D_{s,i} - 2 \cdot \delta)$$

$$k_{i,o} = \frac{D_{s,i}}{D_{s,o}}$$

### 4.3 DISEÑO DE LA MÁQUINA

En este apartado, nos centraremos en la obtención de las características técnicas que ha de tener la máquina para poder ser acoplado al aerogenerador. Asimismo, se efectuarán todos los cálculos de los parámetros de interés del alternador.

#### 4.3.1 OBTENCIÓN CARACTERÍSTICAS DEL ALTERNADOR

Como ya se ha comentado anteriormente, las características de la máquina vendrán dadas según el tipo de aerogenerador a utilizar. Por ello, estudiando las características de este y su curva de características podremos definir cómo será el alternador.

El diseño del generador de flujo auto-conmutado se realizará en base a las especificaciones del aerogenerador “Bornay 6000”. Por lo tanto, todos los parámetros eléctricos y mecánicos se ajustarán para el acople físico y régimen de funcionamiento del aerogenerador.

Bornay 6000 es un aerogenerador de pequeña potencia y reducidas dimensiones, pensado para alimentar pequeños consumos de uso doméstico e industrial. Dicho generador, está diseñado para entregar una potencia eléctrica de 6 kW a plena carga.

Estas son las características técnicas del aerogenerador:

<b>Características técnicas</b>	
<b>Numero hélices</b>	<b>3</b>
<b>Diámetro barrido</b>	<b>4 m</b>
<b>Material</b>	<b>Fibra vidrio/carbono</b>
<b>Dirección rotación</b>	<b>Sentido anti-horario</b>
<b>Sistema control</b>	<b>Regulador electrónico Pasivo por inclinación</b>
<b>Potencia nominal</b>	<b>6 kW</b>
<b>Velocidad rotación</b>	<b>95-600 rpm</b>

Tabla 6: Características Bornay 6000

<b>Velocidad viento</b>	
<b>Arranque</b>	<b>3,5 m/s</b>
<b>Potencia nominal</b>	<b>12 m/s</b>
<b>Frenado automático</b>	<b>14 m/s</b>
<b>Desconexión</b>	<b>20 m/s</b>

Tabla 7: Características en función del viento

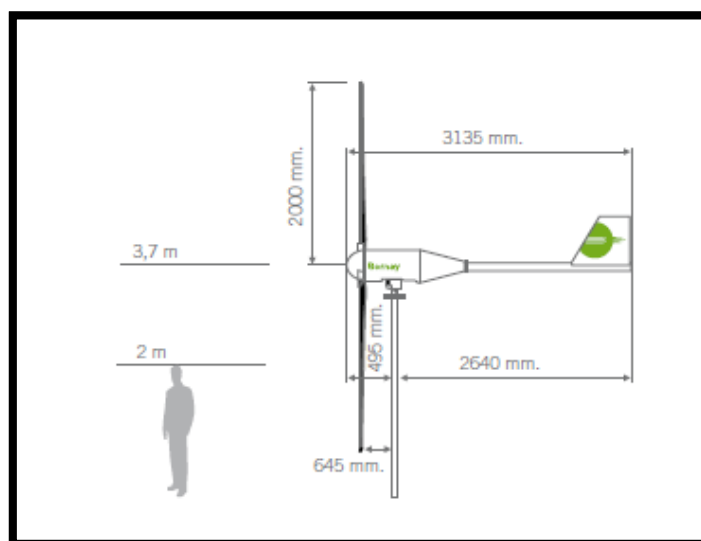


Figura 27: Aerogenerador Bornay 6000

Por lo tanto, es necesario conocer la potencia de la turbina que entregará al generador, asimismo considerando un rendimiento del 90% del generador, la potencia de la turbina necesaria es la siguiente:

$$[11] \quad \eta = \frac{P_{elec}}{P_{turb}} \rightarrow P_{turb} = \frac{P_{elec}}{\eta} = \frac{6000}{0,9} = 6,667 \text{ kW}$$

Sabiendo que el aerogenerador trabajará a una velocidad máxima de 600 rpm, podemos hacer una estimación de la velocidad de rotación nominal. Según la curva de potencia del aerogenerador, aportada por el fabricante, podemos llegar a obtener el valor de la velocidad nominal de rotación del eje del alternador, ya que ira acoplado directamente al eje del rotor de la turbina.

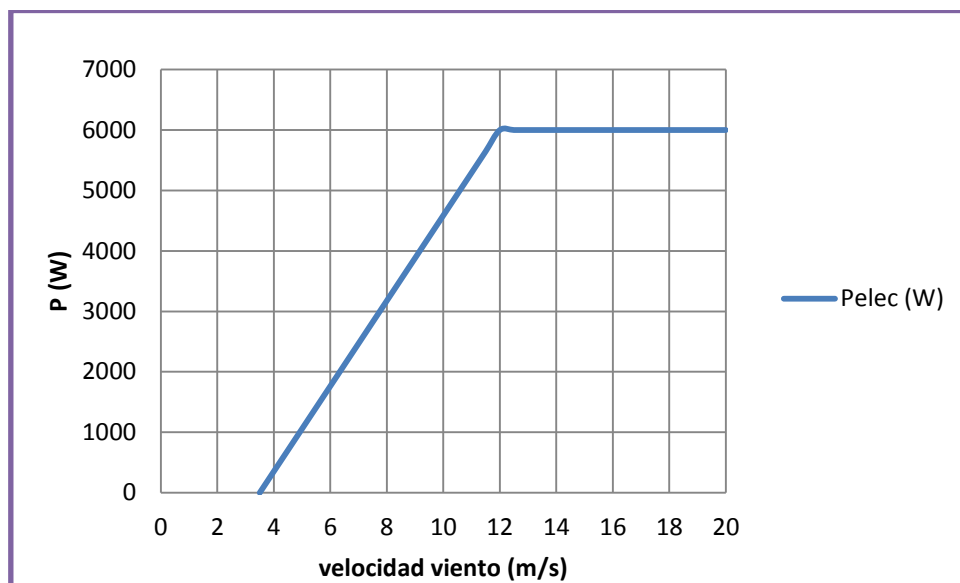


Figura 28: Curva potencia aerogenerador Bornay 6000.

Como podemos ver en la curva de potencia, el aerogenerador trabajará a velocidad nominal cuando la velocidad del viento sea cercana a los 12 m/s. Hasta ese punto, el aerogenerador trabaja a máximo coeficiente de potencia para poder optimizar la potencia extraíble del viento.

Según el tipo de aerogenerador, el coeficiente de potencia varía en función de la velocidad específica. Por lo tanto, realizando una aproximación según el tipo de aerogenerador que es, obtenemos la velocidad nominal de rotación.

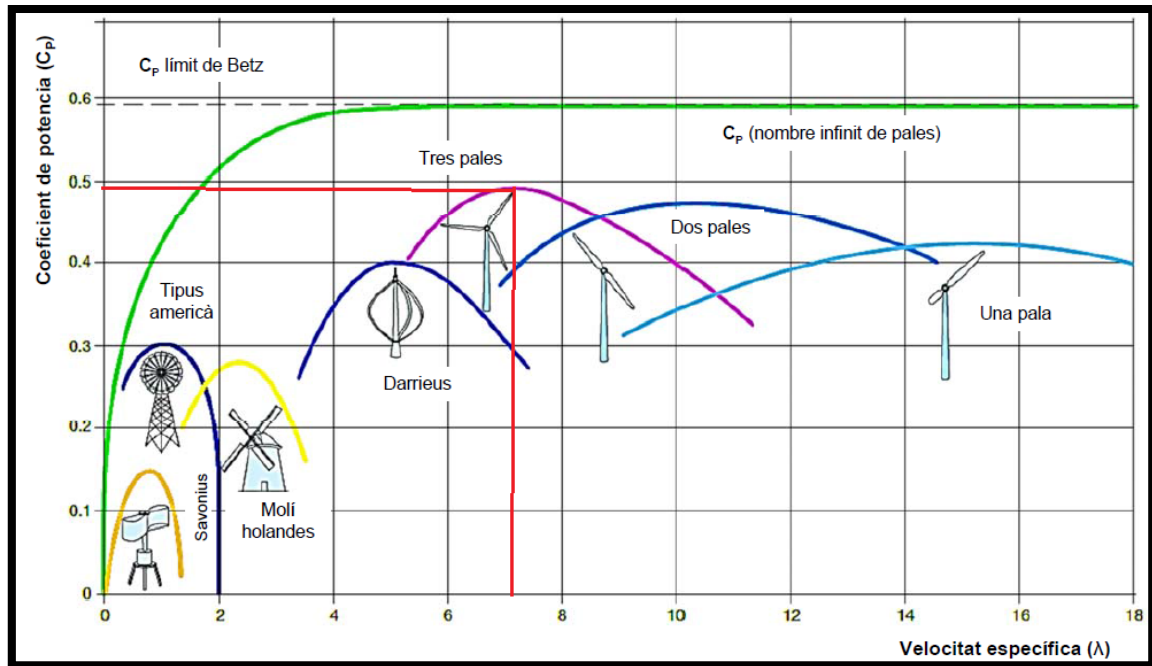


Figura 29: Coeficientes de potencia según tipo de aerogenerador

Para un aerogenerador de 3 palas, el coeficiente de potencia máximo es aproximadamente 0,5 y la velocidad específica de 7. Por lo tanto la velocidad de rotación nominal del aerogenerador será:

$$[12] \quad \lambda = \frac{\omega \cdot r}{v} \rightarrow \omega = \frac{v \cdot \lambda}{r}$$

$$[13] \quad \omega = \frac{12 \cdot 7}{2} = 42 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \rightarrow n = 400 \text{ rpm}$$

Por lo tanto, el diseño del alternador será pensado para una velocidad de trabajo nominal de 400 rpm.

Una vez obtenida la velocidad nominal, el par del generador es el siguiente:

$$[14] \quad T = \frac{P_{\text{turbina}}}{\omega} = \frac{6667}{42} = 158 \text{ Nm}$$

#### 4.3.2 DIMENSIONAMIENTO CON ECUACIONES PARAMÉTRICAS

Estos serán los parámetros orientativos que tendrá la máquina. Substituyendo estos valores en las ecuaciones paramétricas junto con los valores de velocidad angular y par de la máquina obtendremos el diámetro y longitud de esta.

$$Q_S = 12 \quad Q_R = 10 \quad \hat{B}_\delta = 2 \text{ T}$$

$$A_c = 28000 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad \Delta = 5 \text{ A/mm}^2$$

$$\eta = 90\% \quad n = 400 \text{ rpm} \quad m = 3$$

$$P = 6 \text{ kW} \quad V_L = 400 \text{ V} ; \quad V_F = 230 \text{ V} \quad \cos\varphi = 0.85$$

$$k_d = 0,92$$

$$c_s = 0,35$$

$$k_{i,o} = \frac{D_{s,i}}{D_{s,o}} = 0,7$$

$$k_v = 0,4$$

Estos son los parámetros que definirán a la máquina. Pero estos no son los únicos que determinarán las características finales del alternador. Otros parámetros necesarios de estudio son la frecuencia eléctrica que tendrá la tensión inducida y la intensidad de fase que circulará por los bobinados. Todos estos valores representan los parámetros nominales.

$$[15] \quad f_e = \frac{Q_r \cdot n}{60} = \frac{10 \cdot 400}{60} = 66,7 \text{ Hz}$$

$$[16] \quad I_F = \frac{P}{3 \cdot V_F \cdot \cos\varphi} = \frac{6000}{3 \cdot 230 \cdot 0.85} = 10,23 \text{ A}$$

$$[17] \quad D_{s,i}^2 \cdot l = \frac{4 \cdot Q_S \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot Q_R \cdot k_d \cdot c_s \cdot A_c \cdot \hat{B}_\delta}$$

$$D_{s,i}^2 \cdot l = \frac{4 \cdot 12 \cdot 158}{\sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot 10 \cdot 0,92 \cdot 0,35 \cdot 28000 \cdot 2} = 3,013 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$[18] \quad E_{Fase} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot N_{ph} \cdot \frac{Q_R}{Q_S} \cdot k_d \cdot c_s \cdot \hat{B}_\delta \cdot D_{s,i} \cdot l \cdot \omega$$

$$230 = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot N_{ph} \cdot \frac{10}{12} \cdot 0,92 \cdot 0,35 \cdot 2 \cdot D_{s,i} \cdot l \cdot 41,89$$

$$[19] \begin{cases} D_{s,i}^2 \cdot l = 3,013 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \\ D_{s,i} \cdot l = \frac{4,605}{N_{ph}} \end{cases}$$

Como podemos ver en las ecuaciones [15], [16], [17], [18] y [19], asumiendo las correspondientes estimaciones técnicas, podemos llegar a obtener las dimensiones principales del alternador. Estas dimensiones, están en función del número de espiras por fase. Por lo tanto, suponiendo un determinado número de vueltas y adecuándose al factor de ventana del 40%, podemos llegar a obtener distintas dimensiones de la máquina en función del número de espiras.

Para la elección de las dimensiones, nos restringimos a las dimensiones de la góndola del aerogenerador. Al disponer de una amplia variedad de dimensiones a elegir de diámetro y longitud, se optará por el diseño óptimo para poder acoplar el alternador dentro de la góndola. Por lo tanto, se optará por una máquina de mayor diámetro exterior que longitud. Esto es debido a las restricciones que nos impone la góndola.

Finalmente las dimensiones de la máquina serán las siguientes:

$$D_{s,o} = 318 \text{ mm}$$

$$D_{s,i} = 222 \text{ mm}$$

$$l = 61 \text{ mm}$$

$$N_{ph} = 340 \text{ vueltas}$$

$$N_b = 85 \text{ vueltas}$$

$$\tau_s = 58 \text{ mm}$$

$$\delta = 0.7 \text{ mm}$$

$$h_{ys} = h_{slot} = \beta_s = 14,5 \text{ mm}$$

$$h_{pm} = 12 \text{ mm}$$

$$l_{pm} = 44 \text{ mm}$$

$$b_r = 20,3 \text{ mm}$$

$$b_{ry} = 29 \text{ mm}$$

$$h_{pr} = 27,6 \text{ mm}$$

Una vez determinadas las dimensiones de la máquina, se da paso a la comprobación del factor de ventana de la ranura. Esto verifica si el bobinado cabe en la ranura, el espacio ocupado de cobre no puede superar aproximadamente el 40% de la ranura.

$$A_{ranura} = 865,48 \text{ mm}^2$$

$$[20] \quad A_{Cu} = 2 \cdot N_b \cdot S_c = 2 \cdot 85 \cdot 2 = 340 \text{ mm}^2$$

$$[21] \quad K_v = \frac{A_{Cu}}{A_{ranura}} = \frac{340}{865,48} = 0,39$$

Como podemos observar, el diseño que se ha realizado es correcto, ya que el factor de ventana es del 39%.

Una vez realizada la comprobación, se da paso a efectuar el diseño del generador y a realizar las primeras simulaciones con el programa de elementos finitos "Femm". Realizando las simulaciones, se ha observado que hay una clara disminución del flujo concatenado que circula por las bobinas. Por lo tanto, esto repercute en la tensión de fase inducida en valor eficaz, siendo menor del previsto. De tal manera, la solución para aumentar la tensión de fase inducida es incrementar el número de espiras. Para ello, se debe reducir la sección del conductor para seguir cumpliendo el factor de ventana de la ranura,  $K_v=0,4$ . Esta solución hará incrementar la densidad de corriente en los conductores.

Para poder inducir una tensión eficaz de fase de 230 V, a una velocidad nominal de 400 rpm, sería necesario un flujo concatenado máximo de 0,75 Wb, en vez de los 0,56 que se han llegado a obtener. Por lo tanto la modificación del número de espiras es la siguiente:

$$N'_{ph} = 455 \text{ vueltas}$$

$$N'_b = 114 \text{ vueltas}$$

$$[22] \quad A_{Cu} = A_{ranura} \cdot K_v = 0,4 \cdot 865,48 = 346 \text{ mm}^2$$

$$[23] \quad S_c = \frac{A_{Cu}}{2 \cdot N_b} = \frac{346}{2 \cdot 114} = 1,52 \text{ mm}$$

Al no disponer conductores directamente de dicha sección, se empleará cable con conductores en paralelo.

$$\varnothing_{conductor} = 1 \text{ mm} \rightarrow n_c = 2 \rightarrow S_c = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1^2}{4} = 1,57 \text{ mm}^2$$

$$[24] \Delta = \frac{10,23 \text{ A}}{1,57 \text{ mm}^2} = 6,5 \text{ A/mm}^2$$

Como podemos observar en la ecuación [24], la densidad de corriente ha aumentado, pero por otro lado la tensión inducida es la esperada realizando estas modificaciones en los bobinados de las fases.

Por lo tanto, habiendo realizado las modificaciones necesarias para cumplir con los requisitos, el diseño físico del alternador está finalizado.

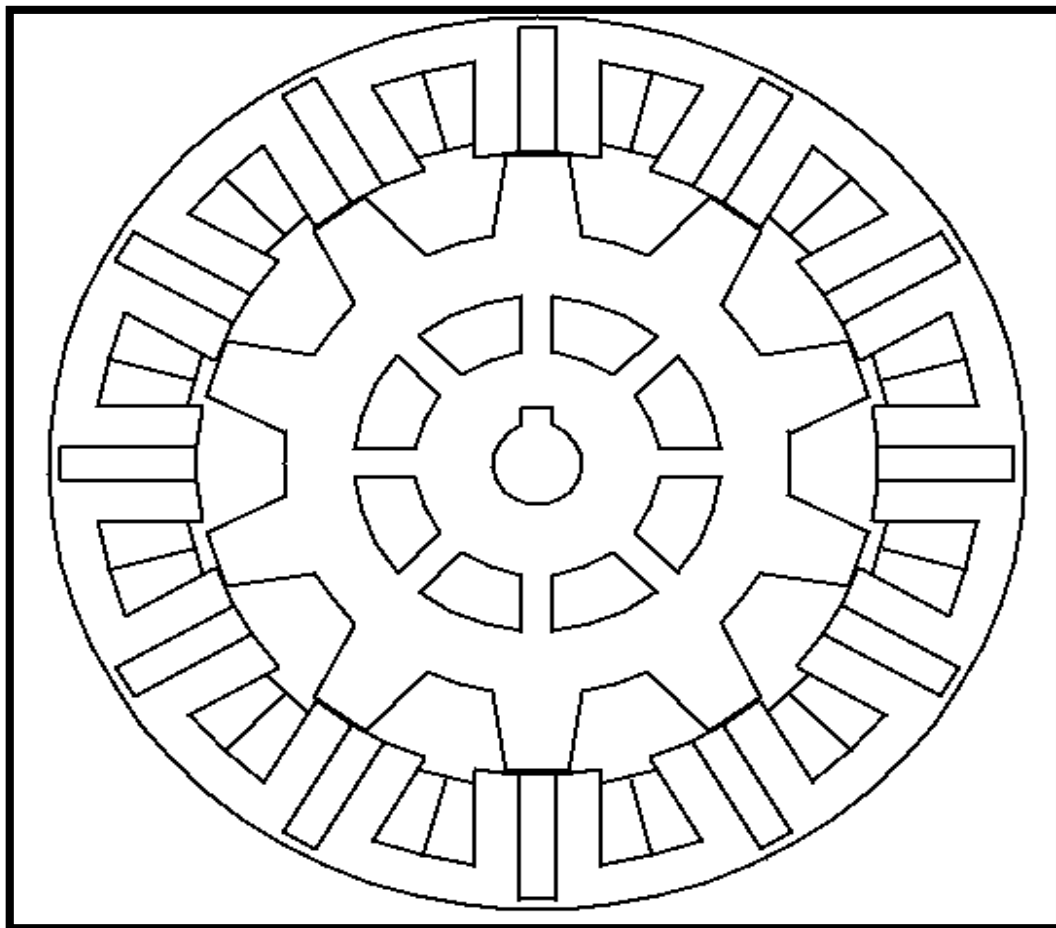


Figura 30: Estructura física alternado diseñado

Como se puede observar en la figura 30, en el rotor se ha realizado extracciones de material ferromagnético para reducir peso y mejorar también por tanto la refrigeración de la máquina, sin afectar a la estructura propia del rotor.



## 4.4 CÁLCULO DE PARÁMETROS

Una vez obtenido el diseño final del alternador, habiendo realizado las modificaciones pertinentes, se da paso al cálculo de los parámetros mecánicos y electromagnéticos del alternador.

\*En las simulaciones realizadas en “Femm” no aparecen las eliminaciones de material ferromagnético en el rotor. No influye en los parámetros del alternador.

### 4.4.1 INDUCCIÓN EN EL ENTREHIERRO

En el diseño de máquinas es necesario conocer la forma de onda de la inducción en el entrehierro. Gracias a esto, podemos verificar si los valores de la inducción se ajustan a los teóricos y por lo tanto, saber si la elección de materiales y diseño son correctos.

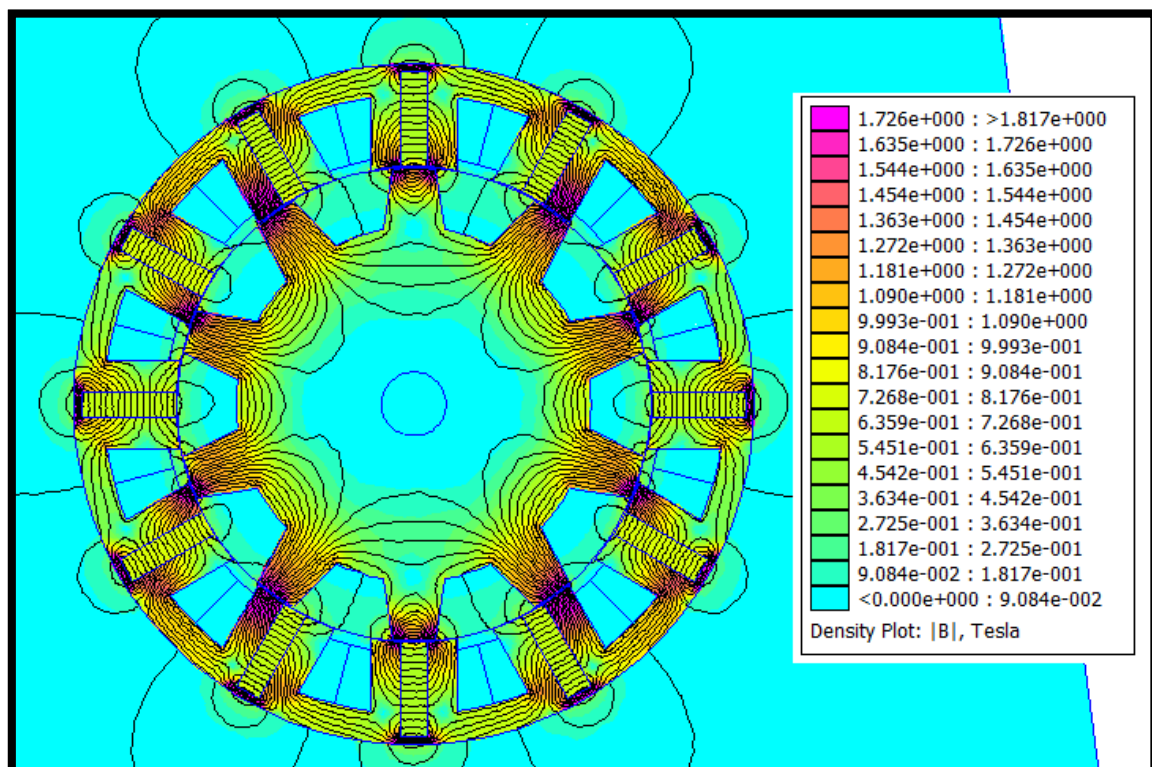


Figura 31: Mapa de densidad de flujo

Como observamos en la figura 31, los valores de las inducciones en los dientes y en los polos salientes son mayores, entorno a los 2 teslas. Esto se debe a la concentración de flujo. Contrariamente, en las coronas de la máquina, los valores de inducción son en torno a 1 tesla. Observamos también como en el centro de la máquina las inducciones son nulas, por ello no afecta la extracción de material ferromagnético en el núcleo del rotor.

Se aprecia también, como circulan las líneas de flujo por la máquina, siendo guiadas por los imanes permanentes. Las líneas de flujo, circulan por los dientes del rotor y posteriormente vuelven a circular por los imanes permanentes.

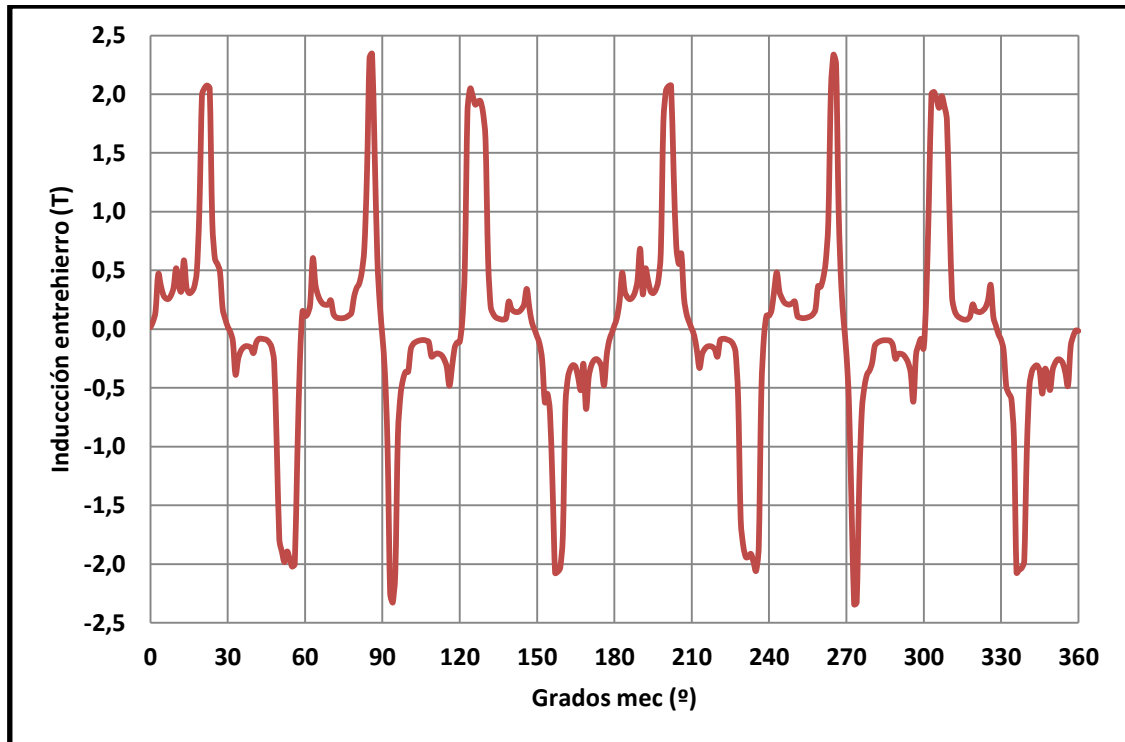


Figura 32: Inducción en el entrehierro

En la figura 32, se detalla las inducciones en el entrehierro rodeando todo su perímetro. Vemos como hay zonas de pico donde estos valores alcanzan las 2 T y en donde en otras zonas son aproximadamente 0,5 T. Los picos de inducción se deben a zonas más saturadas donde coincide el polo saliente y el diente del rotor, por ello, el flujo magnético se concentra en dichas zonas. Los valores se ajustan a los valores típicos de estas máquinas que suelen presentar picos de 2 T y tener formas de onda de las mismas características.

#### 4.4.2 CÁLCULO RESISTENCIA DE FASE

Es necesario obtener el valor de la resistencia de fase. El cálculo en cuestión se realiza considerando una temperatura de trabajo de 75°C. La temperatura hace aumentar la resistencia de un bobinado y por lo tanto se considera dicha temperatura para aproximarse más al valor real de la resistencia cuando el alternador está trabajando.

El cálculo se considera como un polo saliente de corriente continua.

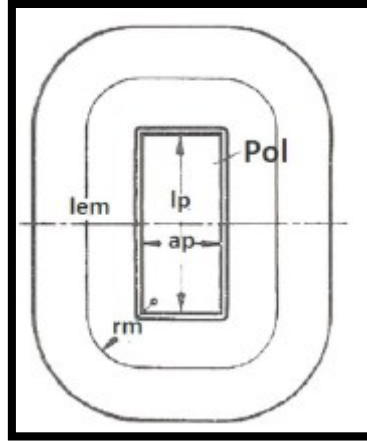


Figura 33: Sección polo saliente y sus dimensiones

$$[25] \quad R_{20^{\circ}C} = \rho_{20^{\circ}C} \cdot \frac{N_{ph} \cdot l_m}{S_c}$$

$$[26] \quad l_m = 2 \cdot (a_p + l_p) + 2\pi r_m$$

$$[27] \quad a_p = 2 \cdot \beta_s + h_{pm} = 2 \cdot 14,5 + 12 = 41 \text{ mm}$$

$$l_p = 61 \text{ mm}$$

$$[28] \quad r_m = \frac{h_{slot}}{4} = \frac{14,5}{4} = 3,625 \text{ mm}$$

$$l_m = 2 \cdot (41 + 61) + 2\pi \cdot 3,625 = 0,227 \text{ m}$$

$$R_{20^{\circ}C} = 0,0172 \cdot \frac{456 \cdot 0,227}{1,52} = 1,17 \Omega$$

$$R_{75^{\circ}C} = \left( \frac{235 + 75}{235 + 20} \right) \cdot 1,17 = 1,42 \Omega$$

$$R_{ph,75^{\circ}C} = 1,42 \Omega$$

#### 4.4.3 FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

En este apartado, obtendremos la forma de onda de la fuerza electromotriz inducida en las diferentes fases del alternador.

El estudio se ha realizado manteniendo los imanes permanentes magnetizados y haciendo girar el rotor hasta completar un período entero. Un período entero son  $360^\circ$  eléctricos, como nuestro alternador tiene 10 dientes en el rotor, el alternador consta de 10 pares de polos. Esto conlleva que únicamente haciendo girar el rotor  $36^\circ$  mecánicos, se completa un período entero.

Por lo tanto en cada variación de ángulo se ha obtenido el flujo concatenado que circula por el interior de cada bobina. Completando los valores para todos los grados de rotación del rotor, se llega a obtener la forma de onda inducida en las fases.

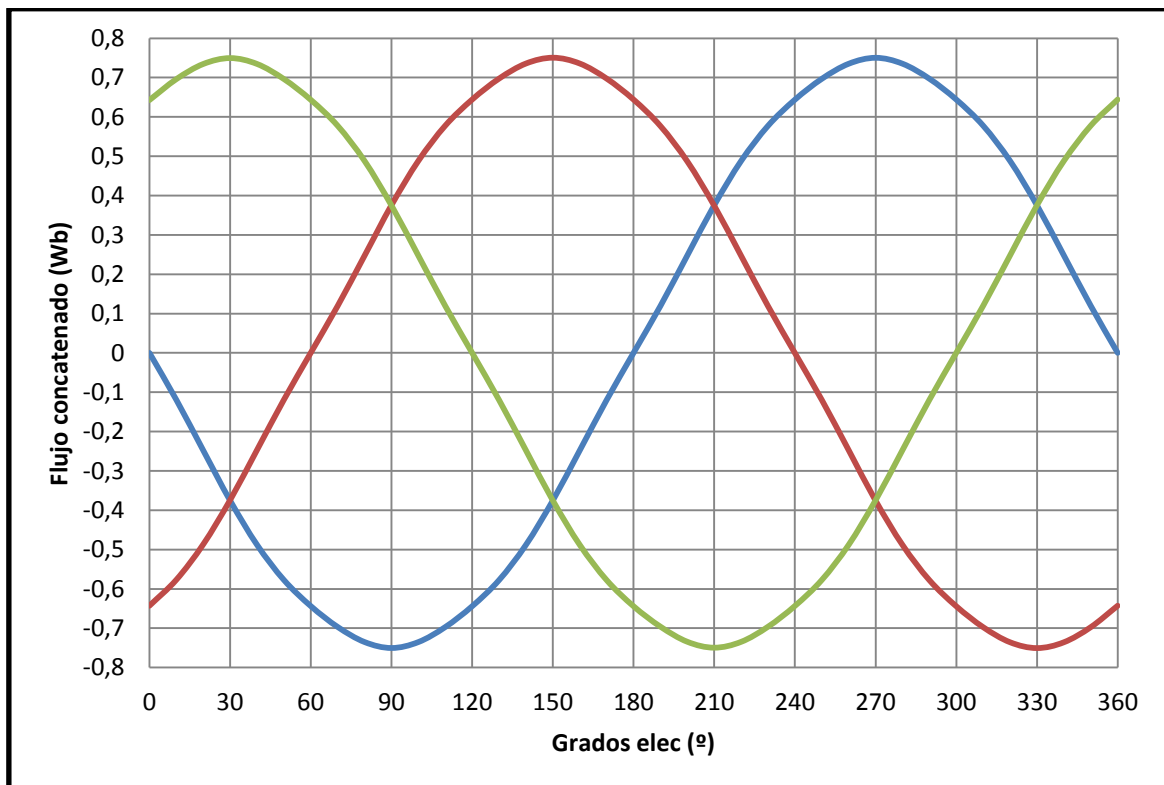


Figura 34: Flujo concatenado de las diferentes fases

Como podemos observar en la figura 34, vemos la forma de onda del flujo concatenado, totalmente senoidal, que circula por las tres fases de la máquina. Según la elección de relación de polos salientes y dientes rotóricos, las fases se desfasan de diferente forma. En este caso, al disponer de 12 polos salientes y 10 dientes rotóricos, el desfase entre fases es de  $120^\circ$  eléctricos.

Por lo tanto, para obtener la tensión inducida en vacío únicamente hay que aplicar las leyes de Faraday-Lenz, que son las siguientes:

$$[29] \quad \psi(t) = -\hat{\psi} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\omega_e = 2\pi f ; f_e = 67 \text{ Hz} \quad n = 400 \text{ rpm}$$

$$\psi(t) = -0,75 \cdot \sin(427 \cdot t)$$

$$[30] \quad e = \frac{d\psi}{dt} ; e = -320,25 \cdot \cos(427 \cdot t)$$

$$\hat{E}_{ph} = 320 \text{ V} \rightarrow E_{ph} = \frac{320}{\sqrt{2}} = 226 \text{ V}$$

Finalmente, vemos como la tensión de fase inducida en vacío es de 226 V, siendo la esperada de 230 V. Una vez el alternador trabaje en carga, el valor de la tensión disminuirá relativamente, en función del índice de carga del alternador.

El alternador se conectará en estrella por lo tanto, los valores de tensión en vacío son los siguientes:

$E_{ph}$	$E_{Línea}$
<b>226 V</b>	<b>391 V</b>

Tabla 8: Valores de tensión de fase y línea en vacío

Como se ha comentado anteriormente, el valor de la tensión y frecuencia dependerán de la velocidad de rotación de la máquina. Por ello, es de provecho conocer la relación existente entre tensión-velocidad y frecuencia-velocidad. Con esta relación podremos saber que tensión y a que frecuencia se genera dependiendo de la velocidad del rotor del aerogenerador.

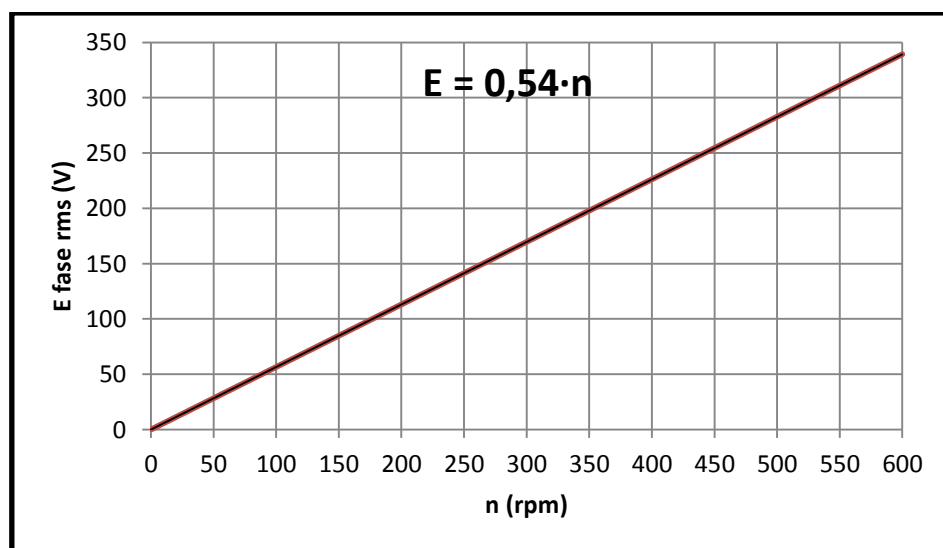


Figura 35: Relación tensión fase eficaz / velocidad de rotación

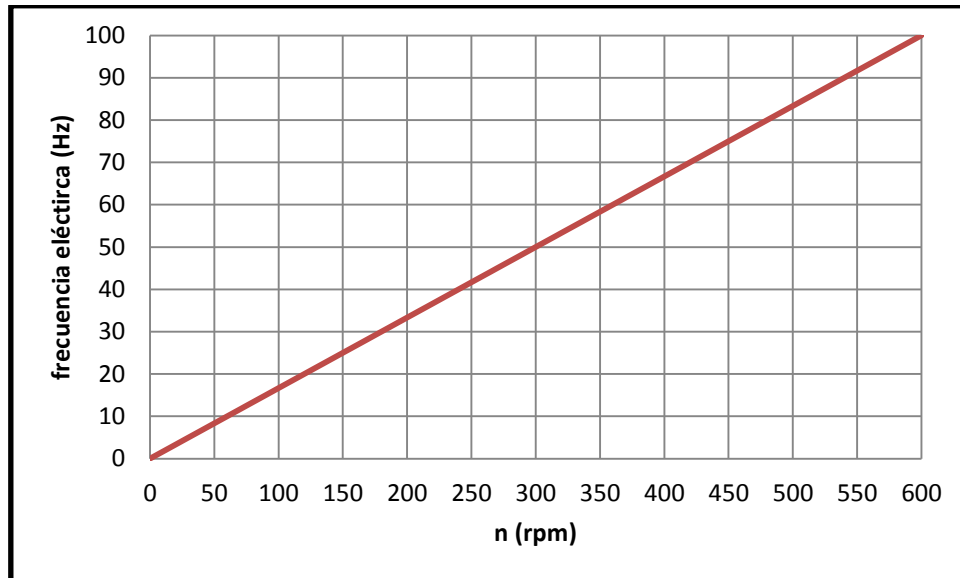


Figura 36: Relación frecuencia eléctrica / velocidad de rotación

Por lo tanto la constantes que relacionan tensión y frecuencia son las siguientes:

$$[31] \quad E_{ph} = 0,54 \cdot n$$

$$[32] \quad f_e = 0,167 \cdot n$$

#### 4.4.4 CÁLCULO INDUCTANCIAS DE FASE

En este apartado, daremos paso al cálculo de las inductancias propias de fase, las inductancias mutua de fase y a las inductancias de los ejes “q” y “d”.

En electromagnetismo, una inductancia es una medida a la oposición a un cambio de corriente de una bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético. Se define como la relación entre el flujo magnético que circula por el interior de la bobina, el número de espiras de dicha bobina y por la intensidad que circular por la bobina.

$$[33] \quad L = \frac{\psi}{i} = N_{ph} \cdot \frac{\phi}{i} = \frac{N_{ph}^2}{\mathfrak{R}_m}$$

##### Inductancia propia de fase

La inductancia propia de fase, dependerá únicamente de la geometría del circuito magnético. Esto se debe a que la reluctancia del circuito magnético varía en función de la posición del rotor, por lo tanto el flujo magnético que circula por el interior de las bobinas también varía.

Para realizar el cálculo mediante “Femm”, desmagnetizaremos los imanes permanentes. Este estudio se califica de estado no saturado, es decir, el flujo magnético creado por los imanes no se tiene en cuenta y por ello se desmagnetizan virtualmente. Seguidamente se inyecta corriente continua en la fase a estudiar y se irá variando la posición del rotor grado a grado. Con esto, llegaremos a obtener el valor de la inductancia en función de la posición del rotor de una fase.

$$[34] \quad L_a = \frac{\psi_a}{i_a} = \frac{N_{ph,a}^2}{\mathfrak{R}_m}$$

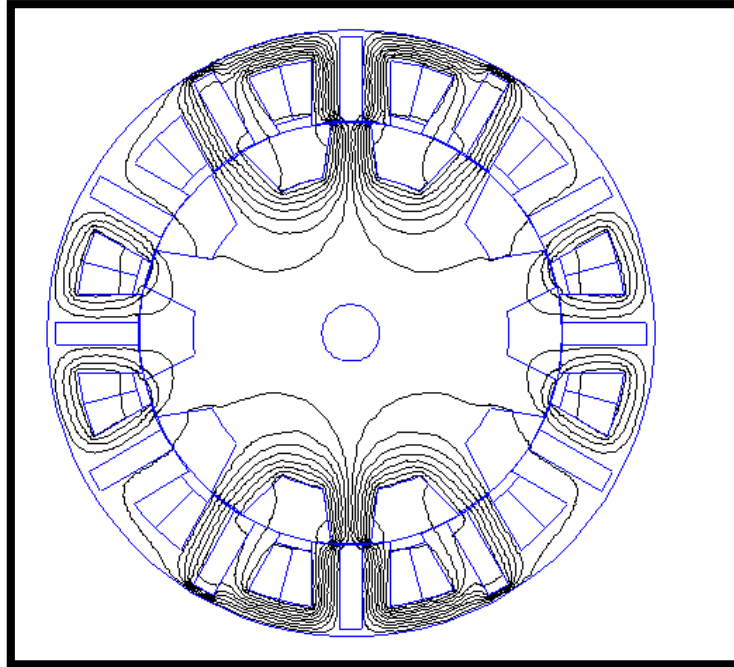


Figura 37: Líneas de flujo excitando una sola fase

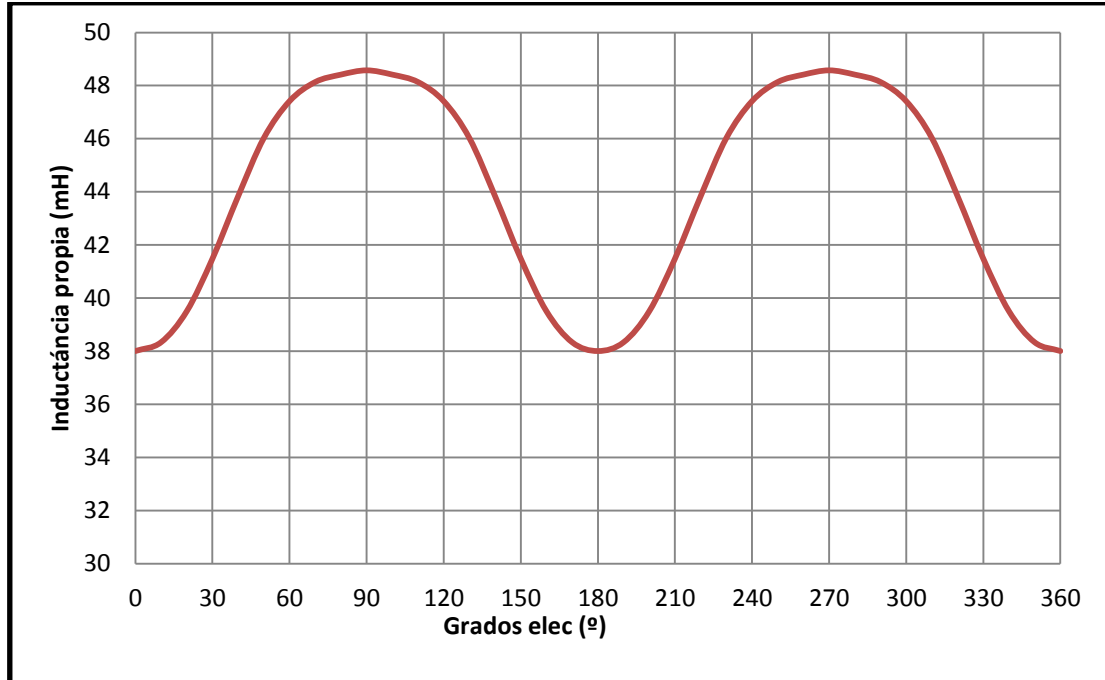


Figura 38: Inductancia propia de fase

Observando la figura 37, vemos como la inductancia varía según la posición del rotor. Cuando el rotor llega a completar un período de 36° mecánicos, la inductancia completa dos periodos. En este caso, el valor máximo es de aproximadamente 48 mH y el valor mínimo de 38 mH.

Los valores de la inductancia de fase de las otras fases del motor son exactamente iguales, únicamente desfasadas 120° eléctricos.

Se puede aproximar el valor de la inductancia en función de los grados eléctricos. Por lo tanto, el valor de la inductancia propia de fase tendrá una amplitud y un desplazamiento, siguiendo una función trigonométrica.

$$[35] \quad A = \frac{L_{a,m\acute{a}x} - L_{a,min}}{2} = \frac{48,57 - 38}{2} = 5,285 \text{ mH}$$

$$[36] \quad D = \frac{L_{a,m\acute{a}x} + L_{a,min}}{2} = \frac{48,57 + 38}{2} = 43,29 \text{ mH}$$

$$[37] \quad L_a = D + A \cdot \sin(\theta)$$

$$L_a = 43,29 + 5,285 \cdot \sin(\theta)$$

#### Inductancia mutua de fase

En una máquina real, no únicamente estamos trabajando con una sola fase, por lo que las demás fases también influyen sobre las otras fases. Este fenómeno se da cuando las fases trabajan simultáneamente y por lo tanto crean también flujo magnético que circulará por las bobinas de otras fases.

Por lo tanto, el flujo magnetizante creado por la bobina "a" que circulará por la bobina "b" será el que cree la inductancia mutua entre ambas fases.

$$[38] \quad L_{b,a} = \frac{Nph, b \cdot \phi_{b/a}}{i_a}$$

Dónde:

$$\phi_{b/a} = \text{flujo magnet. en "b" creado por "a"}$$

$$L_{a,b} = L_{b,a}$$

$$L_{a,c} = L_{c,a}$$

$$L_{b,c} = L_{c,b}$$

Las inductancias mutuas irán desfasadas 120° eléctricos.

Para realizar el cálculo de la inductancia mutua, se excita únicamente una fase, por ejemplo la fase "a". Seguidamente se observa el flujo concatenado en la bobina "b" creado por la bobina "a". Por lo tanto, dividiendo este valor por el valor de la intensidad de la bobina creadora de flujo, en este caso la bobina "a", se obtiene la inductancia mutua.



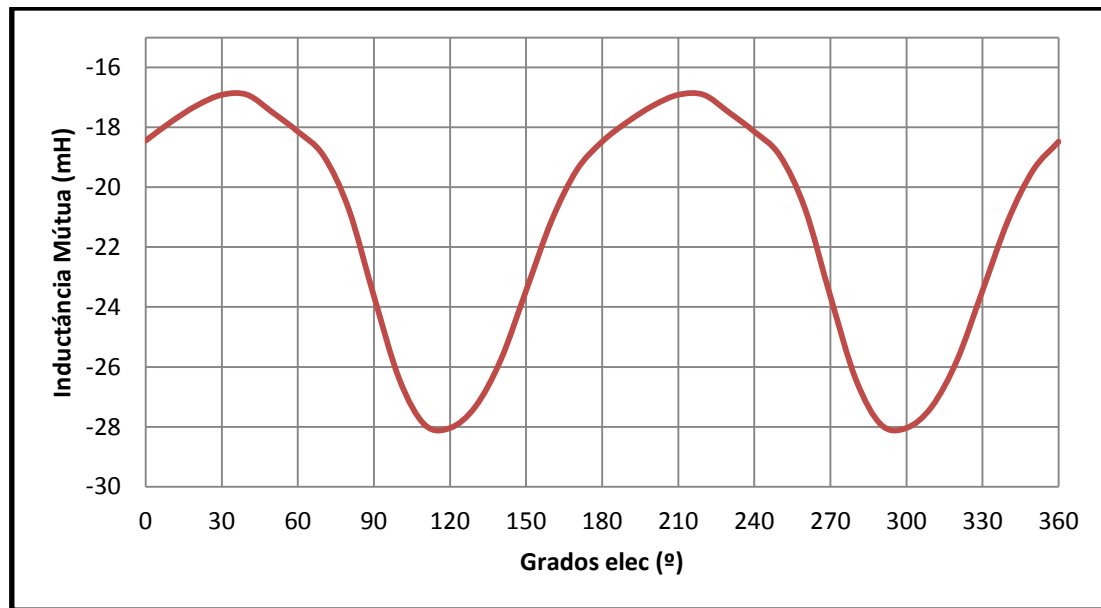


Figura 39: Inductancia mutua

Vemos como en la figura 38, existe también una periodicidad en los valores de las inductancias mutuas de fase. Los valores llegan a estar entre -28 mH y los -17 mH.

#### Inductancias de ejes “q” y “d”

La máquina de flujo conmutado es una máquina síncrona, con inductancias senoidales por lo tanto puede ser estudiada y analizada con el modelo de ejes “q” y “d”. Los valores de las inductancias “q” y “d” no varían mucho, por lo tanto pueden considerarse constantes.

Para obtener ambas inductancias se ha empleado un método simplificado que únicamente necesita estudiar las inductancias en dos posiciones. El estudio en la posición alineada de rotor y estator ( $0^\circ$  mecánicos) y con el rotor desplazado  $-9^\circ$  mecánicos. Se ha de realizar en condiciones de saturación y no saturación.

#### ▪ Condición de no saturación:

En éste caso se obtiene la inductancia de fase para la posición alineada de ejes. Asimismo, obtenemos el flujo concatenado que atraviesa la bobina cuando los imanes están desmagnetizados.

$$0^\circ - L_a = 0,0380074 \text{ H} \rightarrow i_a = 10,23 \cdot \sqrt{2} \rightarrow \psi_a = 0,55 \text{ Wb:}$$

▪ **Condición de saturación:**

En éste caso, se obtiene la inductancia de fase para la posición alineada también pero considerando que los imanes están magnetizados. Esto crea una disminución del flujo concatenado que atraviesa la bobina. Realizando la diferencia entre flujos concatenados saturados y no saturados, obtenemos el flujo concatenado creado por el imán.

$$0^\circ - L_a = 0,0203 \text{ H} \rightarrow i_a = 10,23 \cdot \sqrt{2} \rightarrow \psi'_a = \psi_a - \psi_m = 0,294 \text{ Wb}$$

$$\psi_m = 0,256 \text{ Wb}$$

Una vez obtenido el valor del flujo concatenado creado por el imán, inyectamos corriente continua por las distintas fases del alternador, considerando la no saturación. Por lo tanto de ésta forma obtendremos el flujo concatenado del eje “d” en la posición  $0^\circ$ :

$$I_a = I = 10,23 \cdot \sqrt{2} \text{ A} ; I_b = I_c = -\frac{1}{2}I = -\frac{1}{2} \cdot 10,23 \cdot \sqrt{2} \text{ A}$$

En dicha posición ( $0^\circ$ ):

$$I_d = I \quad I_q = 0$$

$$[39] \quad \psi_d = \frac{2}{3} \left( \psi_a - \frac{1}{2} \psi_b - \frac{1}{2} \psi_c \right)$$

$$\begin{aligned} \psi_a &= 0,743 \text{ Wb} \\ \psi_b &= -0,373 \text{ Wb} \\ \psi_c &= -0,373 \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$\psi_d = \frac{2}{3} \left( 0,743 - \frac{1}{2} \cdot (-0,373) - \frac{1}{2} \cdot (-0,373) \right) = 0,744 \text{ Wb}$$

Siendo la inductancia del eje “d”:

$$[40] \quad L_d = \frac{\psi_d - \psi_m}{I_d} = \frac{0,744 - 0,256}{10,23 \cdot \sqrt{2}} = 0,0337 \text{ H}$$

$$L_d = 33,73 \text{ mH}$$

Para calcular la inductancia del eje “q” simplemente tenemos que girar el rotor  $9^\circ$  en sentido anti-horario. De ésta forma, se cumple las siguientes premisas:

$$I_d = 0 \quad I_q = I$$

$$[41] \quad L_q = \frac{\psi_d}{I_q}$$

$$[42] \quad \psi_q = \frac{2}{3} \left( \psi_a - \frac{1}{2} \psi_b - \frac{1}{2} \psi_c \right)$$

$$\psi_q = \frac{2}{3} \left( 0,9 - \frac{1}{2} \cdot (-0,45) - \frac{1}{2} \cdot (-0,45) \right) = 0,9 \text{ Wb}$$

$$L_d = \frac{0,9}{10,23 \cdot \sqrt{2}} = 0,0622 \text{ H}$$

$$L_q = 62,21 \text{ mH}$$

#### 4.4.5 CÁLCULO DEL PAR PARÁSITO

El par parásito, también conocido en inglés como cogging torque, es el par creado por la interacción entre los imanes permanentes del estator con el núcleo ferromagnético del rotor. Los imanes ejercen un par resistivo el cual hay que vencer para poder hacer girar el rotor.

En los primeros diseños realizados y haciendo las simulaciones con “Femm” los valores del par parásito eran demasiado altos. Normalmente estos valores fluctúan entre los 2 y 1 Nm. Debido a esto, se tuvo que modificar el diseño del rotor, teniendo que ampliar la anchura de los dientes del rotor y aumentar ligeramente el entrehierro. Gracias a estas modificaciones se logró reducir el valor del par resistivo obteniendo valores razonables, pero aun así siendo valores elevados.

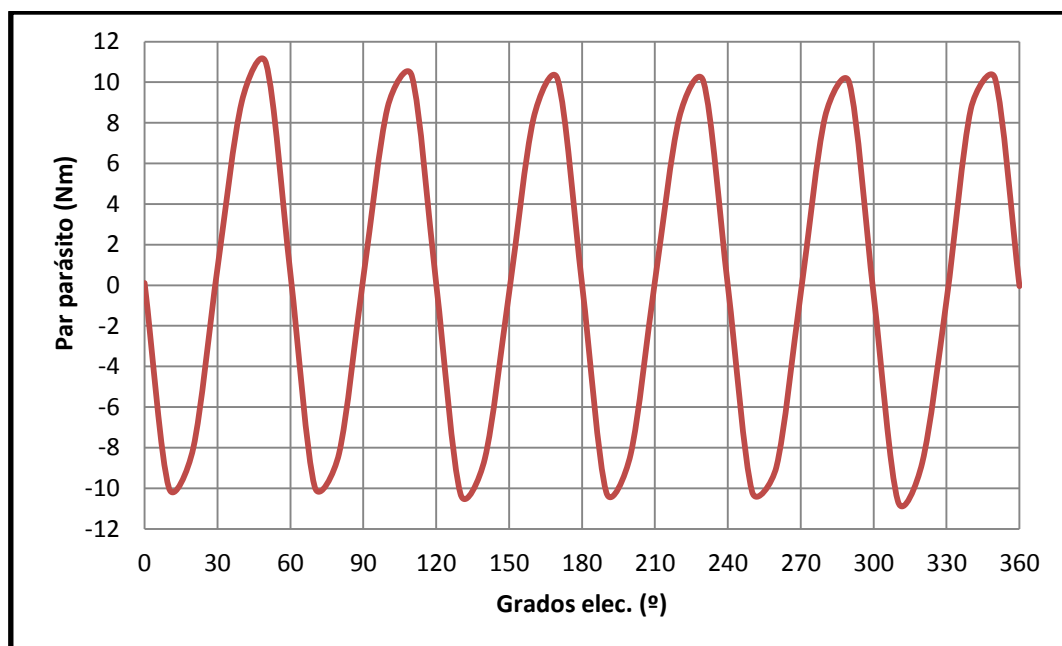


Figura 40: Par parásito o cogging torque

Para la obtención de los valores del par parásito, únicamente hay que hacer girar el rotor para poder estudiar el par resistivo en función del ángulo del rotor. Todo esto, sin alimentar las fases del motor. Solo actúan los imanes permanentes sobre el rotor.

Observando la figura 39, vemos como existe una periodicidad en el par cada 60° eléctricos o 6° mecánicos. Los valores oscilan entre los 10 y -10 Nm.

#### 4.4.6 PAR ESTÁTICO

El par estático es el par resultante ejercido por la máquina al excitar las fases con intensidades constantes y estudiar el par creado en distintas posiciones del rotor. Esto nos da una idea en que valores de par trabajará nuestra máquina.

El cálculo se realiza excitando las fases con corriente continua a unas ciertas intensidades. Estas intensidades han de ser las correspondientes en corriente trifásicas, desfasadas  $120^\circ$  eléctricos. Posteriormente, se gira el rotor y se mide el valor del par creado por la máquina. El estudio se realiza trabajando como motor.

Por lo tanto, siendo las intensidades:

$$I_a = 10,23 \cdot \sqrt{2} \text{ A} ; I_b = I_c = -\frac{1}{2}I_a = -\frac{1}{2} \cdot 10,23 \cdot \sqrt{2} \text{ A}$$

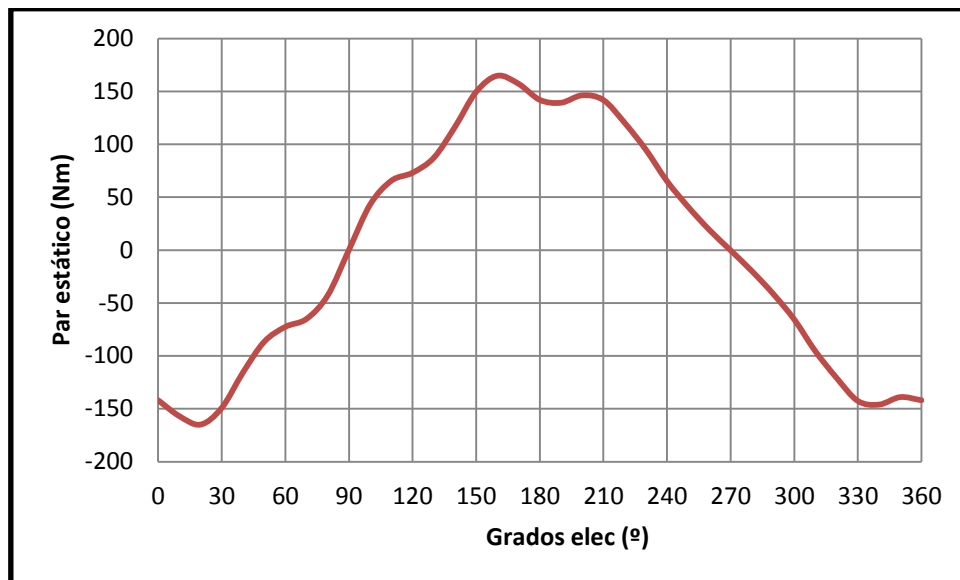


Figura 41: Par estático

En la figura 40, vemos como el valor máximo de par máximo creado por la máquina es de aproximadamente 150 Nm. Gracias a esto, vemos que los valores previstos de diseño son muy próximos a los obtenidos y el diseño se ajusta a lo esperado.

#### 4.4.7 PAR ELECTROMAGNÉTICO

Para saber realmente el par proporcionado por la máquina, hay que realizar las simulaciones pertinentes como si la máquina estuviese trabajando como motor. Por lo tanto, hay que simular con “Femm” inyectando corrientes trifásicas variables en el tiempo al mismo tiempo que vamos girando el rotor de la máquina. Con esto conseguimos hacer trabajar a la máquina como motor y saber el par que proporciona.

Las condiciones de trabajo para simular:

$$[43] \ i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega_e \cdot t) \ ; \ \omega_e = 2\pi f_e$$

$$f_e = 66,67 \text{ Hz} \rightarrow \omega_e = 418,9 \text{ rad/s}$$

$$n = 400 \text{ rpm} \rightarrow \omega = 41,89 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 41,89 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 2400,12 \frac{\circ}{\text{s}} \rightarrow t = 4,166 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Finalmente, simulando en condiciones nominales, el rotor tarda en avanzar un grado mecánico 41,66 ms. Por lo tanto, habrá que alimentar las fases haciéndolas variar el valor temporalmente cada 41,66 ms.

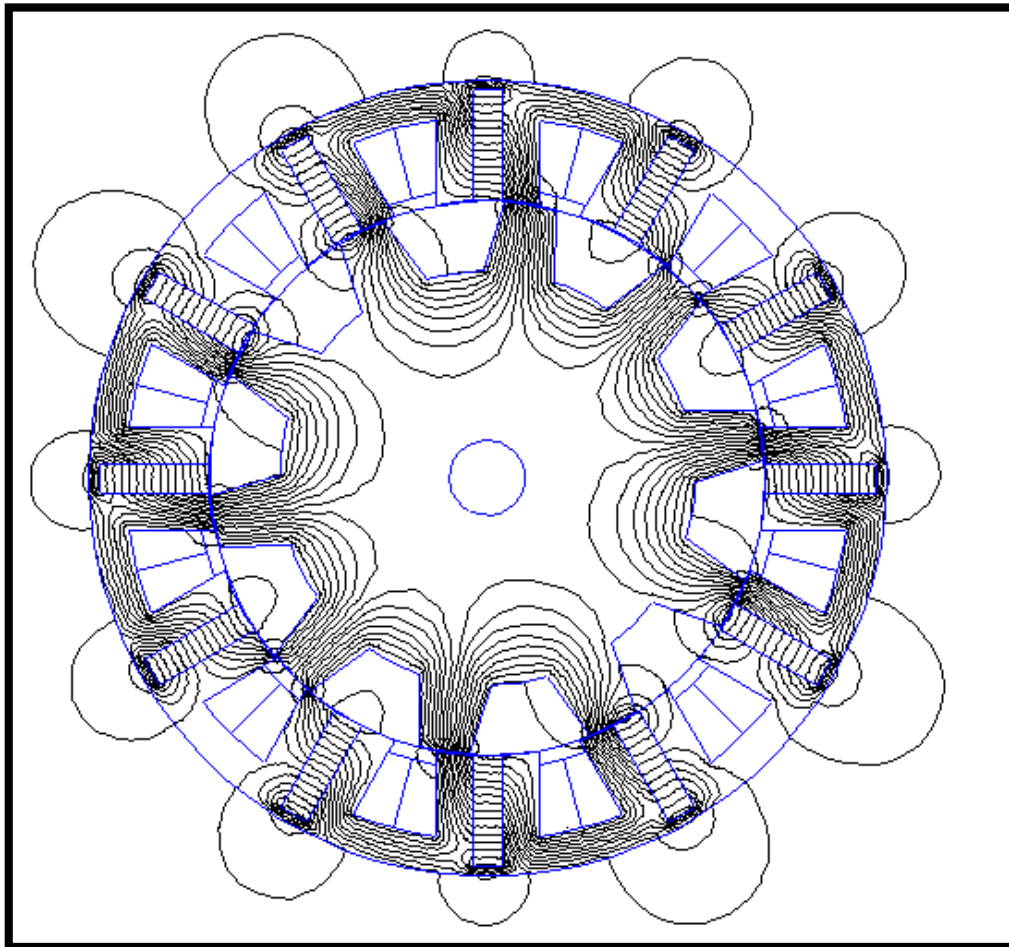


Figura 42: Líneas de flujo trabajando como motor a plena carga

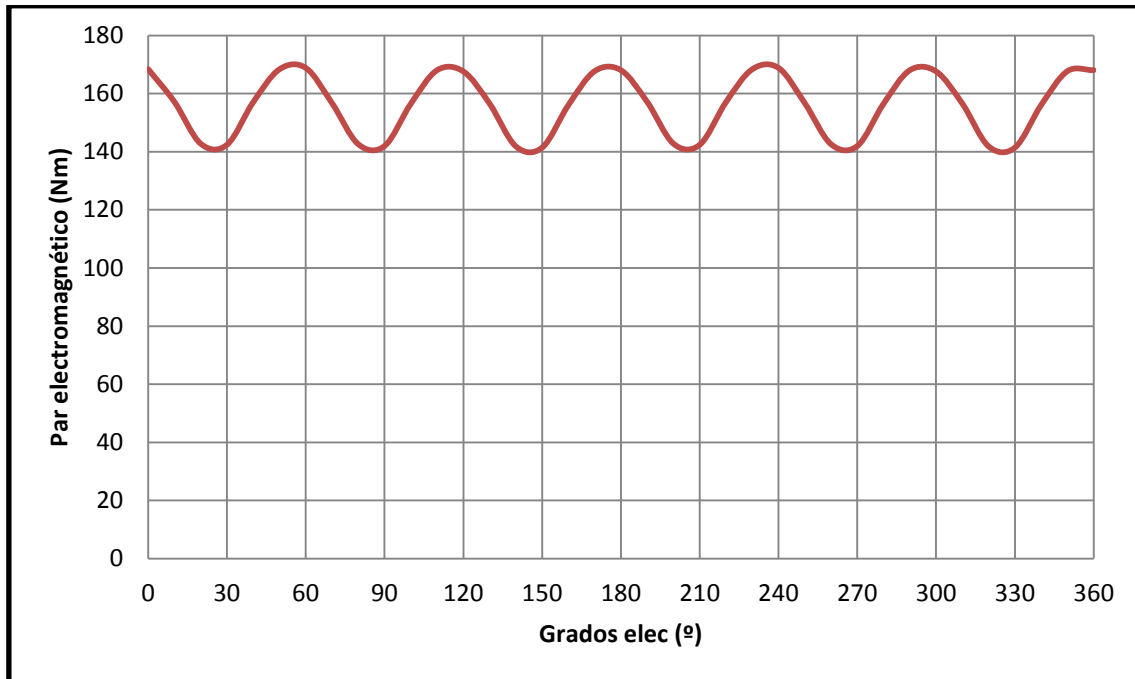


Figura 43: Par electromagnético

Como podemos observar en la figura 41, trabajando en condiciones nominales, la máquina proporciona un par electromagnético donde cuyos valores fluctúan entre 164 Nm y 140 Nm. Estos valores, son muy próximos a los esperados, entonces podemos decir que el dimensionamiento de la máquina ha sido correcto.

#### 4.4.8 CÁLCULO DE PÉRDIDAS Y RENDIMIENTO

En este apartado calcularemos las distintas pérdidas que tiene esta máquina y que rendimiento tiene la máquina en condiciones nominales.

##### Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre, son aquellas producidas por la intensidad que circula por un conductor eléctrico. La circulación de la intensidad por el conductor provoca que el propio conductor se caliente, por ello, parte de la energía eléctrica se transforma en energía calorífica y aparezcan pérdidas en los conductores.

$$[44] P_{Cu} = 3 \cdot R_{ph} \cdot I_f^2$$

$$P_{Cu} = 3 \cdot 1,42 \cdot 10,23^2 = 446 \text{ W}$$

$$P_{Cu} = 446 \text{ W}$$

### Pérdidas mecánicas

Las pérdidas mecánicas son aquellas producidas por el contacto entre piezas mecánicas y por el roce del aire con el rotor en movimiento. El contacto entre piezas que roten respecto un eje, provocan pérdidas de energía entre dichas partes que rozan. En el caso de las pérdidas producidas por el aire, son debidas a la circulación de dicho fluido por el interior de la máquina. Éstas, frenan la rotación de la máquina y es ahí donde se producen las pérdidas.

Por lo tanto, las pérdidas mecánicas son la suma de las pérdidas producidas por los rodamientos de la máquina y las generadas por la circulación del aire.

$$[45] P_{Mec} = P_{rod} + P_{air}$$

$$[46] P_{rod} = 0,15 \cdot n_{rod} \cdot \left(\frac{n}{1000}\right) \cdot d_{eje}^2$$

$$P_{rod} = 0,15 \cdot 2 \cdot \left(\frac{400}{1000}\right) \cdot 3^2 = 3,25 W$$

$$P_{rod} = 3,25 W$$

$$[47] P_{air} = k_D \cdot D_{rot} \cdot (l + 0,6 \cdot \tau_p) \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{rot}}{60} \cdot n\right)^3$$

$$P_{air} = 10 \cdot 0,2206 \cdot (0,061 + 0,6 \cdot 0,346) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,2206}{60} \cdot 400\right)^3 = 17,8 W$$

$$P_{air} = 17,8 W$$

$$P_{Mec} = 3,25 + 17,8 = 21,05 W$$

Dónde:

$n_{rod}$  = número de rodamientos = 2

$d_{eje}$  = diámetro eje = 3 cm

### Pérdidas adicionales

Las pérdidas adicionales son muy difíciles de concretar y es una estimación de diversas pérdidas en diferentes partes de la máquina, como puede ser en el cobre o en propio material ferromagnético.

Por lo tanto, el cálculo de estas pérdidas, es totalmente orientativo.

$$[48] P_{ad} \approx 0,01 \cdot P_N$$

$$P_{ad} \approx 0,01 \cdot 6000 = 60 W$$

$$P_{ad} = 60 W$$

### Pérdidas en el hierro

Las pérdidas en el hierro son aquella que son provocadas por el núcleo magnético de la máquina. Estas, son las más difíciles de cuantificar, y vienen dadas por las pérdidas del ciclo de histéresis y por las corrientes de Foucault.

En éste caso, tratar de cuantificar las pérdidas en las máquinas de flujo conmutado es muy complicado. Por eso, en este caso, se ha optado por realizar una aproximación intentando cuantificarlas para poder obtener el rendimiento de la máquina.

Se cuantificarán de la siguiente manera:

- Pérdidas en el hierro en polo saliente del estator
- Pérdidas en el hierro en la corona del estator
- Pérdidas en el hierro del diente del rotor
- Pérdidas en el hierro en la corona del rotor

Por lo tanto, conociendo los valores medios de las inducciones en dichos puntos, se podrá cuantificar las pérdidas de la máquina a través de la siguiente expresión:

$$[49] P_{Fe} = k_{fe} \cdot Perd_{f0} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(m_{c,r} \cdot \left(\frac{B_{c,r}}{B_0}\right)^2 + m_{c,s} \cdot \left(\frac{B_{c,s}}{B_0}\right)^2 + m_{p,s} \cdot \left(\frac{B_{p,s}}{B_0}\right)^2 + m_{d,r} \cdot \left(\frac{B_{d,r}}{B_0}\right)^2\right)$$

$$P_{Fe} = 2 \cdot 2,7 \cdot \left(\frac{66,67}{50}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(4,75 \cdot \left(\frac{0,5}{1,5}\right)^2 + 5,84 \cdot \left(\frac{1}{1,5}\right)^2 + 5,35 \cdot \left(\frac{1,45}{1,5}\right)^2 + 3,3 \cdot \left(\frac{1,2}{1,5}\right)^2\right)$$

$$P_{Fe} = 85 W$$

$$\sum Pérdidas = 446 + 21,05 + 60 + 85 = 612,05 W$$

$k_{fe}$  = coeficiente pérdidas adicionales = 2

$Perd_{f0}$  = pérdidas a 50Hz 1,5 T(W)

$m$  = masa componentes

Todos los cálculos de las pérdidas ha sido considerándolo a plena carga. Proporcionándole un par medio de 155 Nm al generador a velocidad nominal de 400 rpm, estaríamos entregándole una potencia mecánica de 6492,6 W.

Entonces:

$$[50] \eta = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{P_{ab} - \sum Pérdidas}{P_{ab}}$$

$$\eta = \frac{6492,6 - 612,05}{6492,6} = 0,906$$

$$\eta = 90,6 \%$$



## 4.5 CARACTERÍSTICAS FINALES

Estas son las características finales del alternador diseñado.

$D_{s,o}$	<b>318 mm</b>
$D_{s,i}$	<b>222 mm</b>
$k_{l,o}$	<b>0,7</b>
$l$	<b>61 mm</b>
$Q_S$	<b>12</b>
$Q_R$	<b>10</b>
$m$	<b>3</b>
$\delta$	<b>0,7 mm</b>
$N_{ph}$	<b>455 vueltas</b>
$\Delta$	<b>6,5 A/mm<sup>2</sup> cosφ = 0.85 5,8 A/mm<sup>2</sup> cosφ = 1</b>
$E_{ph}$	<b>230 V</b>
$I_F$	<b>10,23 A</b>
$n$	<b>400 rpm</b>
$P$	<b>6 kW</b>
$\eta$	<b>90,6 %</b>
$R_{ph}$	<b>1,42Ω</b>
$L_{ph}$	<b>43,29 mH</b>
$L_d$	<b>33,73 mH</b>
$L_q$	<b>62,21 mH</b>

Tabla 9: Características nominales alternador flujo conmutado diseñado

## 4.6 MASA DE MATERIALES

Es importante conocer la masa de los materiales que conforman el propio alternador.

Parte máquina	Volumen
Estator	$0,0014632 \text{ m}^3$
Rotor	$0,0013943 \text{ m}^3$
Imán x 12	$3,861 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

Tabla 10: Volumen de los materiales

Parte máquina	Masa
Estator	$11,19 \text{ kg}$
Rotor	$10,66 \text{ kg}$
Imán x 12	$2,935 \text{ kg}$
Bobinado	$2,4 \text{ kg}$
Masa total máquina	$27,2 \text{ kg}$

Tabla 11: Masa de los materiales

## 5. CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS

Una vez obtenido el diseño final de la máquina, es necesario conocer los tipos de convertidores electrónicos que se emplearán y sus respectivas características.

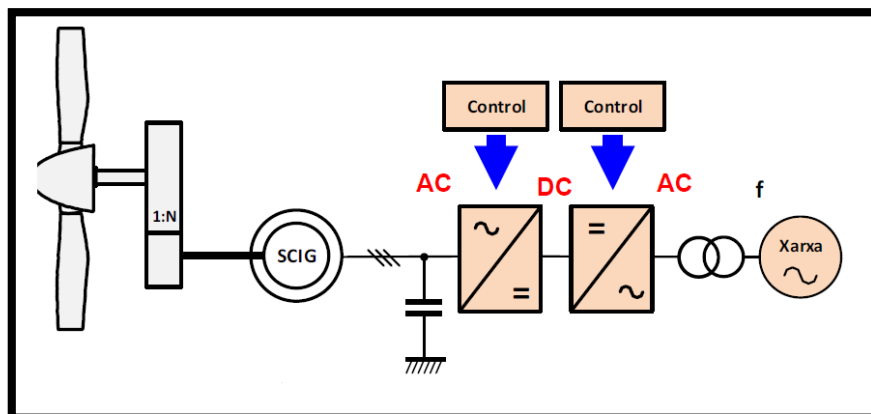


Figura 44: Convertidores AC/DC y DC/AC

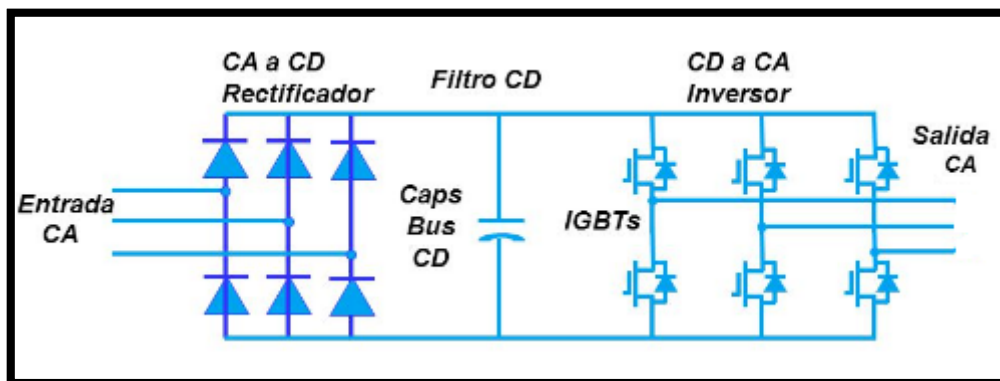


Figura 45: Esquema eléctrico rectificador e inversor

La tensión de salida del alternador primeramente se rectificará a continua. Esto se hará mediante un puente rectificador trifásico. Posteriormente, dicho bus de continua, se ondulará a través de un inversor que determinará una tensión determinada a frecuencia determinada.

### Rectificador trifásico

Se utilizará un puente rectificador trifásico “Semikron”.

- Modelo: SKD 33/12

V <sub>rrm</sub>	V <sub>rsm</sub>	I <sub>d</sub>
1200 V	1300 V	33 A

Tabla 12: Características diodos de potencia del rectificador

**V<sub>rrm</sub> (Tensión inversa de pico repetitiva):** Es la que puede ser soportada en picos de 1 ms, repetidos cada 10ms de forma continuada.

**V<sub>rsm</sub> (Tensión eficaz):** Es la que puede ser soportada durante 10 ms cada 10 minutos.

**I<sub>d</sub>:** Intensidad nominal

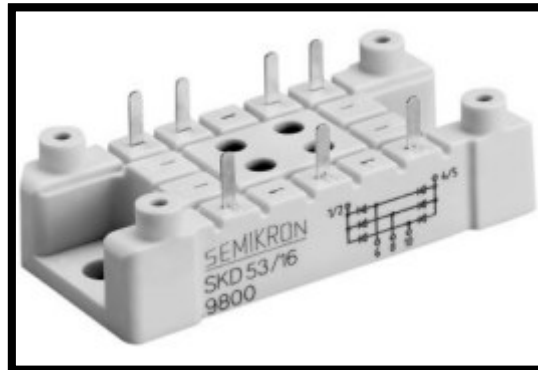


Figura 46: Puente rectificador trifásico SKD 33/12

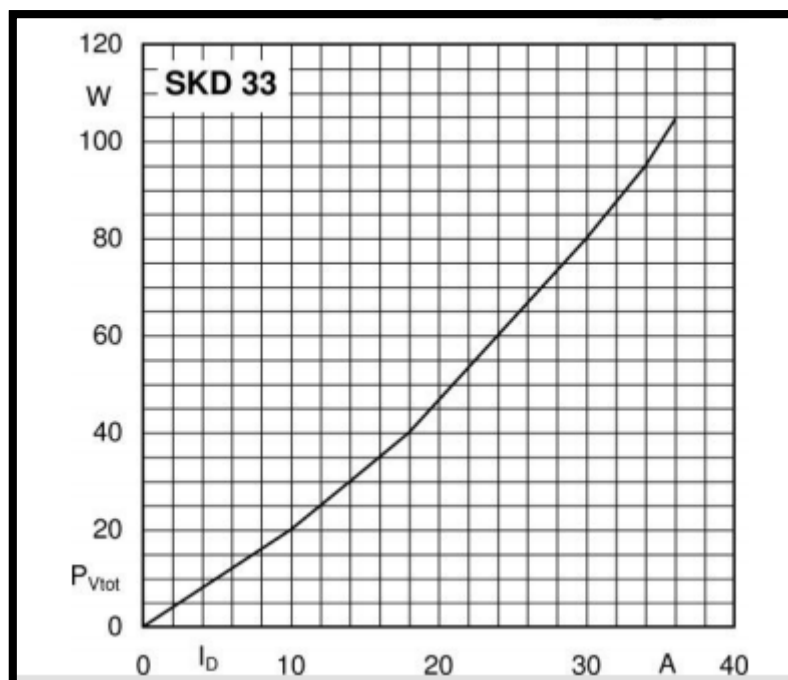


Figura 47: Pérdidas en función de la intensidad

En caso de trabajar a velocidad nominal, circulando una intensidad de 10,23 A, el rectificador produciría unas pérdidas de unos 20 W.

Por lo tanto en la salida del alternador, la tensión en el bus de continua será la siguiente y respetando la siguiente restricción:

$$[51] V_{CC} = V_L \cdot \sqrt{2}$$

$$[52] \sqrt{2} \cdot V_L \leq V_{rrm}$$

Trabajando en el caso más extremo, es decir, generando cuando el rotor gira a 600 rpm:

$$V_{CC} = 562 \cdot \sqrt{2} = 795 \text{ V}$$

$$795 \text{ V} \leq 1200 \text{ V}$$

Trabajando en condiciones nominales:

$$V_{CC} = 380 \cdot \sqrt{2} = 537 \text{ V}$$

$$537 \text{ V} \leq 1200 \text{ V}$$

#### Inversor trifásico

En el caso del inversor, se trata de un “Windy Boy 6000A”

- Max potencia DC: 6300 W
- Max Voltaje entrada DC: 600 V
- Rango voltaje salida: 250-600 V
- Min voltaje en vacío para modo Turbina: 300V
- Potencia recomendada trabajando constantemente: 5500 W
- Intensidad nominal DC: 26 A

Por lo tanto, los valores de potencia y tensión de salida del alternador, cumplen con las características del inversor. La salida de la tensión del inversor, será a escoger según las necesidades del cliente, ya que dicho inversor es programable en un rango de salidas del voltaje. En el caso de que la tensión de entrada en corriente continua sea superior a la máxima establecida por el inversor, saltarán las protecciones del inversor. Este caso se podría dar, pero es poco probable, ya que la desconexión del aerogenerador sería antes de alcanzar la velocidad máxima de 600 rpm.

$$[53] P \leq P_{inversor}$$

$$6000 \text{ W} \leq 6300 \text{ W}$$

$$[54] V_{CC} \leq V_{max,inversor}$$

$$537 \text{ V} \leq 600 \text{ V}$$



Figura 48: Windy Boy 6000A

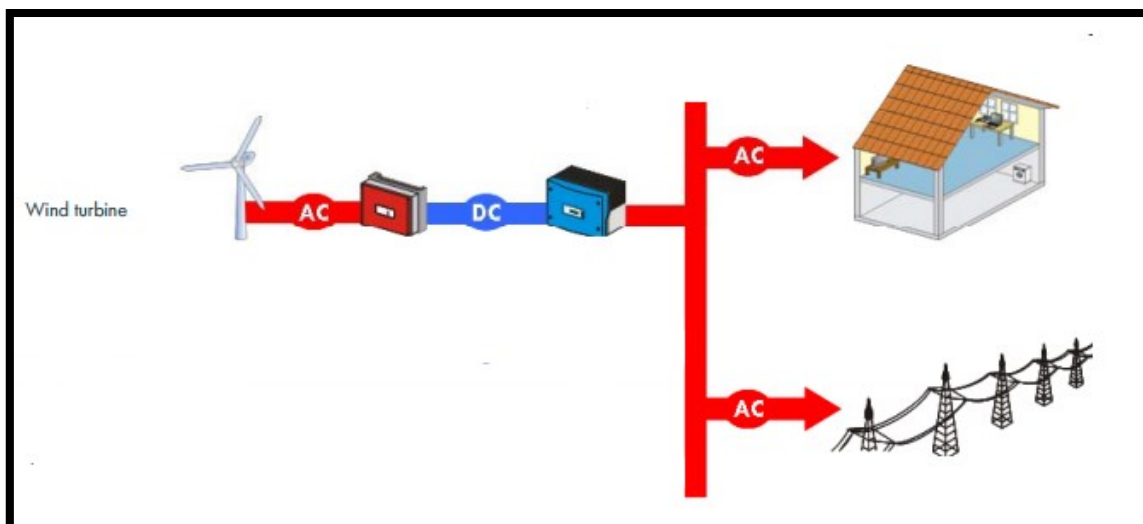


Figura 49: Sistema de conversión eléctrico

## 6. MONTAJE DE LA MÁQUINA.

En éste apartado se hablará del proceso de fabricación y montaje de los motores de corriente alterna. El método de construcción de los motores es bastante similar en todos. Se van ensamblando las distintas piezas que conforman la máquina a construir. Básicamente, el proceso se divide en el montaje de estator y rotor por separado.

Primeramente se lamina el rotor y se apila. Una vez apilado, se ensambla juntamente con el eje de la máquina. De forma simultánea se lamina y se apila el estator. Se montan los respectivos bobinados del motor. Una vez obtenido estos elementos, se ensambla el estator con la carcasa exterior. Finalmente, se monta el conjunto del motor con los diferentes elementos que lo conforman como puede ser las tapas exteriores, anillos rozantes y los rodamientos. Llegados a este punto, la máquina está lista para ser testeada, pintada y empaquetada para su posterior venta.

Para realizar el diseño del estator, se puede optar por un diseño del estator de una sola pieza, creando puentes de unión entre las diferentes celdas que conforman el alternador. La segunda opción es realizar el diseño del estator sin utilizar puentes entre las diferentes celdas del estator. Por lo cual no sería una sola pieza el estator, sino varias.

La principal ventaja de utilizar un estator de una sola pieza unido por puentes en la parte superior del imán permanente, es que el montaje se facilita mucho y únicamente hay que introducir los imanes en las ranuras. En contrapartida, en la zona de los puentes, se satura el material y se pierde un poco de flujo concatenado que circulará por la bobina, despreciable en todo caso.

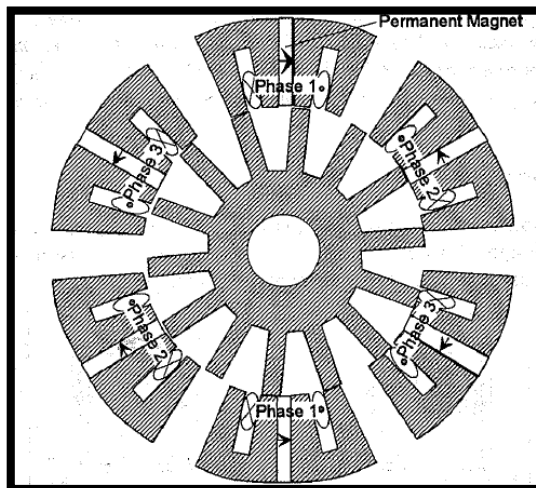


Figura 50: Estator de varias piezas

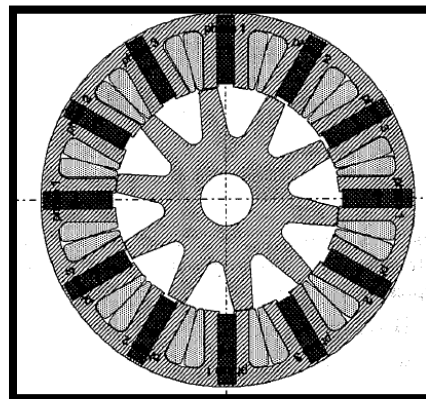


Figura 51: Estator única pieza con puentes

En este caso, se ha optado por realizar un diseño de estator unificado, como la figura 49, por lo tanto simplificando el proceso de montaje y fabricación del alternador.

### Tapas exteriores

El objetivo principal de las tapas exteriores es contener la estructura del motor, donde los rodamientos se apoyan y se encasta el eje del motor. También tiene como finalidad dejar paso al aire para así refrigerar la máquina de forma natural. Aunque no todas las máquinas disponen de tapaderas con ranuras para dejar el paso del aire. Normalmente, las tapas están hechas de hierro colado, aluminio o zinc.



Figura 52: Tapas exteriores

### Carcasa protectora

Las carcasas protectoras conforman el exterior de la máquina y ensamblan las tapas exteriores y el propio estator de la máquina.

Los materiales que conforman la carcasa varían según la potencia de la máquina y la protección que se le quiera dar a ésta. Normalmente están hechas de hierro colado, acero o aluminio.

El ensamblaje de la carcasa con las tapas exteriores se consigue simplemente mediante tornillos. Tanto las tapas protectoras como la carcasa disponen de agujeros normalizados que permiten la fijación de ambos mediante pernos.

Por otro lado, el estator también ha de ser acoplado en el interior de la carcasa. Por ello, se diseña un tope en el interior de la carcasa, donde el estator quedará inmóvil. Para introducir el estator, se calienta la carcasa y al dilatarse, se introduce el estator. Dejando enfriar la carcasa, el estator quedará totalmente acoplado a la carcasa una vez enfriada y gracias al tope diseñado en el interior.

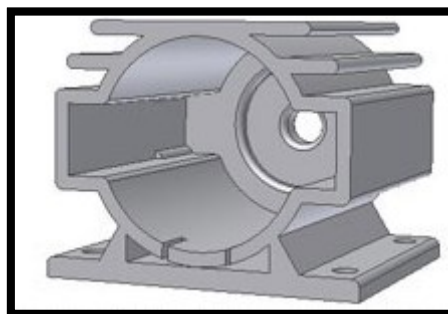


Figura 53: Carcasa máquina eléctrica



### **Eje**

El eje es el elemento que permite la rotación del rotor alrededor del mismo. Dicho material sostiene al rotor apoyando entre las tapas conjuntamente con los rodamientos.

Los materiales del eje han de tener una dureza entre 35 y 55 en la escala Rockwell C. Están diseñados con aceros o aceros inoxidables, los últimos para ser protegidos en los ambientes hostiles industriales y garantizar así una perfecta rotación de la máquina.

El método de montaje que se ha decidido optar es por presión. Una vez apilada la chapa del rotor, se introduce el eje prensándolo contra el rotor. De ésta forma conseguimos ensamblar rotor y eje.

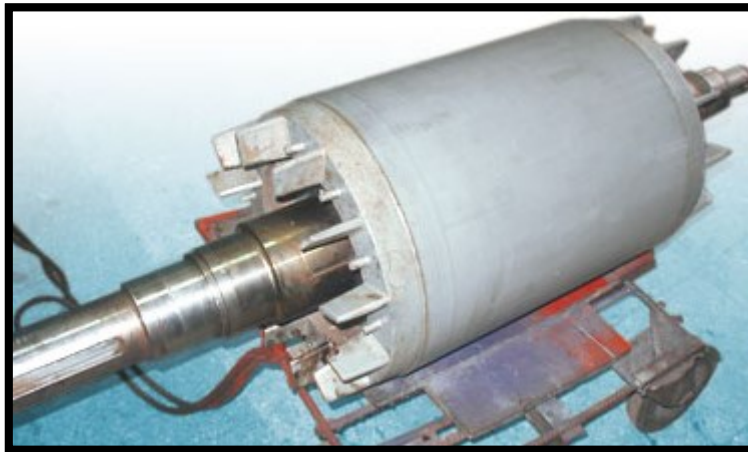


Figura 54: Eje motor eléctrico

### **Imanes permanentes**

El uso de imanes permanentes en las maquinas eléctricas a veces puede ser problemático. Normalmente se debe a que su capacidad de ser mecanizado y ensamblado es costosa y peligrosa para el propio material.

En éste caso los imanes van encastados en las ranuras de los polos salientes del estator. Por lo tanto el imán ha de estar sujeto de alguna manera. La forma en la cual se realizará será mediante adhesivos. Este material adhesivo se impregnará principalmente por la base superior de la ranura del imán y parte de las paredes de la ranura, donde posteriormente se encastará el imán de forma vertical. De esta forma, se consigue el material adhesivo se expanda por la superficie del material. Juntamente con la presión propia de los materiales y la ayuda del adhesivo el imán permanente quedará perfectamente sujeto al estator. En éste caso al disponer del imán en el estator, no es necesario tomar más medidas ya que no sufrirá fuerzas centrífugas. En otros casos donde se disponen en el rotor, es necesario tomar más medidas de seguridad para garantizar que el imán no se desenganche de su lugar.

### **Estator y rotor**

Una vez apilada todas las chapas que conformaran el estator y el rotor, se ha de garantizar que no se muevan, por eso, se han de fijar entre ellas. Existen diferentes métodos de sujeción, pero el que se utilizará en el montaje del alternador será mediante pernos, pernos de una longitud superior a 61 mm. Tanto el estator como el rotor, dispondrían de cuatro orificios normalizados que permitirán la sujeción introduciendo los tornillos del métrico correspondiente.



Figura 55: Diferentes estator y rotor apilados

## 7. COMPARATIVA COMERCIAL

Una vez realizado el diseño y estando la máquina lista para fabricarse (previamente habría que hacer test y alguna posible modificación), es hora de comparar el trabajo realizado con alternadores síncronos totalmente comerciales.

Para realizar la comparativa, compararemos un alternador comercial síncrono del tipo “Frameless”, es decir, sin estructura de tapas, lo que quiere decir que el rotor de la máquina es el propio eje de la turbina. Las características técnicas son muy similares, únicamente difiere el tipo de estructura que sustenta al eje de la máquina.

No es de ayuda compara alternadores del mismo tipo o similar pero de distintas potencias y dimensiones.

### Diseño propio vs Alexion Alternator 300STK3M

	Alexion Alternator	Diseño propio
<b>Velocidad nominal</b>	<b>350 rpm</b>	<b>400 rpm</b>
<b>Potencia nominal</b>	<b>5 kW</b>	<b>6 kW</b>
<b>Par entrada</b>	<b>160 Nm</b>	<b>158 Nm</b>
<b>Rendimiento</b>	<b>83 %</b>	<b>90%</b>
<b>Intensidad</b>	<b>12,1 A</b>	<b>10,23 A</b>
<b>Tensión de fase</b>	<b>240 V</b>	<b>230 V</b>
<b>Par parásito</b>	<b>1,5 Nm</b>	<b>10 Nm</b>
<b>Resistencia de fase</b>	<b>1,36 <math>\Omega</math></b>	<b>1,42 <math>\Omega</math></b>
<b>Inductancia de fase</b>	<b>10,1 mH</b>	<b>43,3 mH</b>
<b>Masa</b>	<b>24,5 kg</b>	<b>27,2 kg</b>

Tabla 13: Comparativa alternadores

Como podemos observar en la figura 13, la comparativa se ha realizado con un alternador comercial de características de trabajo muy parecidas.

Las velocidades de rotación nominales son muy próximas, tanto como las potencias nominales de cada máquina. El par de la turbina de entrada en ambas máquinas es casi igual. Existe una pequeña diferencia en el rendimiento de la máquina, la nuestra tiene un valor ligeramente superior. El resto de valores de salida como de tensión e intensidad son muy próximos también, esto se debe a la similitud de potencias y velocidades de trabajo.

Las diferencias se presentan en el par parásito o cogging torque, nuestros valores son muy superiores respecto al suyo. Son casi 10 veces más de par resistivo respecto al suyo. La inductancia de fase es bastante superior también, esto es debido a que la reluctancia resultante del circuito magnético es menor. Esto se debe a que el factor de relación de diámetros del estator es de 0,7, dónde normalmente en estos diseños se realizan con un factor de 0,55 y por lo tanto afecta a la reluctancia total del circuito magnético. Finalmente las masas de ambas máquinas son casi iguales, en torno a 25 y 27 kg. Esto nos podría decir que nuestro alternador tiene un densidad de potencia de 220,6 W/kg, donde el alternador comercial de 204 W/kg.

Estos resultados bastante similares entre ellos, nos indican que el diseño llevado a cabo no se aleja nada de la realidad y son muy similares a alternadores comerciales. Esto indica que podría ser un buen prototipo a modificar para disminuir el par resistivo e incluso para construir físicamente.

## 8. EVALUACIÓN ECONÓMICA PROTOTIPO

El presupuesto de la máquina es de forma orientativa, según el coste de los materiales podremos cuantificar cuánto cuesta materialmente hablando la máquina. Asimismo, se realizará una estimación de costes de montaje y mecanizado de la máquina.

### Coste materiales

Coste material	Cantidad	Precio	Coste
Imán NdFeB 32	2,935 kg	90 €/kg	264,15 €
Chapa M270-35 <sup>a</sup>	21,85 kg	1,75 €/kg	38,25 €
Cobre esmaltado	2,4 kg	11 €/kg	26,4 €
-	-	-	328,8 €

De los resultados anteriores, podemos observar que el coste de las materias primas para la construcción del alternador será de 328,8 €.

Obviamente, los materiales a utilizar también han de ser tratados y mecanizados para poder realizar el montaje total de la máquina, cumpliendo tolerancias y dimensiones. Por ello, conlleva un coste de mecanización y de mano de obra.

### Costes de mecanizado y montaje

-Para el montaje del bobinado trifásico de los polos en el estator, serían necesarias unas 4 horas de trabajo. Considerando que la mano de obra cuesta aproximadamente 50 €/h, el coste del bobinado es de 200 €.

-Para la construcción del estator, son necesarias 174 chapas. Cada corte de chapa a láser es aproximadamente de 3 €. Por lo tanto el coste de corte del estator es de 522 €

-Para la construcción del rotor, son necesarias 174 chapas. Cada corte de chapa a láser es aproximadamente de 3 €. Por lo tanto el coste de corte del rotor es de 522 €

-Para la construcción propia del alternador contando encaje de tapas, eje y carcasa, se puede aproximar a 1500 €.

### Coste de elementos

-El coste del inversor “Windy boy 6000<sup>a</sup>” es de 2567 €.

-El coste del puente rectificador trifásico es aproximadamente de 21 €

-El coste de las diferentes conexiones y cableado entre elementos puede aproximarse a 75 €.

### Coste de ingeniería

-Para el diseño del alternador se han empleado alrededor de unas 120h de trabajo. Considerando que el coste del ingeniero es de 35 €/h, el coste sería de 4200 €.

Diseño alternador de flujo conmutado para generación mini-eólica  
Gonzalo Guardia Palomera

El coste del alternador no es completo, ya que faltaría diseñar las tapas del alternador, la carcasa y el propio eje. Si omitimos todos estos elementos, podemos decir cuánto podría costar un prototipo para ver su funcionamiento y por lo tanto diseñar a posteriori unas tapas, carcasa y eje.

Finalmente, el coste de dicho prototipo se aproximaría a **9935,8 €**. Todo esto para poder testear el alternador con todos sus componentes para poder comprobar las condiciones de trabajo.

En caso de completar el diseño se tendría que tener en cuenta el coste de la fabricación de las tapas, ejes y carcasa. Asimismo, sumándole el coste de montaje de todo el alternador al completo.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el diseño del alternador de flujo conmutado realmente han sido los esperados. Hemos alcanzado el objetivo de diseñar un alternador de ciertas características que cumpla unos requisitos pre-establecidos según las características técnicas del aerogenerador. Por contrapartida, también han surgido problemas que han hecho ralentizar el desarrollo del proyecto y por lo tanto, no poder dar un mayor alcance al proyecto.

Las características físicas y electromagnéticas se han cumplido y por lo tanto el diseño es apto para ser realizado y modificado. También habría que hacer más hincapié en la reducción del par parásito. Hubiese sido positivo haber estudiado con mayor profundidad dicho tema para poder reducir su efecto. Otro aspecto a mejorar sería realizar un estudio de pérdidas del hierro más extensas, pero igualmente los valores orientativos son válidos para realizar una estimación de rendimiento.

Otra posible opción sería considerar el diseño del alternador de flujo conmutado como “frameless”. Las características del propio alternador no se verían modificadas, sino únicamente el tipo de estructura física que conforma la máquina.

En conclusión, se ha realizado un buen diseño que podría ser mejor en caso de haber tenido más tiempo para poder estudiar en profundidad el proyecto.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto final de carrera se lo quiero agradecer primeramente en especial a mi familia, que son las personas que me apoyan siempre y me ayudan en todo lo posible. También a mis amigos y compañeros de universidad que me han ayudado a llegar a este punto tan bonito. Por supuesto, agradecer también a todo el equipo de docencia de la universidad y en especial al director del proyecto Pere Andrada Gascón que me ha guiado y enseñado todo sobre este proyecto.

## BIBLIOGRAFIA

- WWEA. Small wind report, 2015.
- TONY BURTON. Wind Energy Handbook 2nd 77achine, ISBN 978-0-470-69975-1.
- FENERCOM. Guía sobre la tecnología mini-eólica, 2012.
- YEADON,W.H., YEADON, A.W. Handbook of small electric motors. McGraw-Hill. 2001
- AKURU, U.B., MAARTEN,J.K., Evaluation of flux switching PM Machines for medium-speed wind generator drives.
- ANDRADA, P., MARTINEZ, F. Flux switching alternators for small wind generation. Madrid (Spain) 4th to 6th May, 2016.
- WEI HUA, M.C., Cogging torque reduction of switching permanent magnet Machines without skewing.
- ZHU, Z.Q., PANG, Y. Influence of design 77achine7777n on output torque of flux switching permanent magnet Machines. Harbin (China), 3-5 September, 2008.
- LIVIU, S., EMIL, P. Design of a permanent magnet switching Machine.
- ZHU, Z.Q., WEI HUA, M.C., Design of flux switching permanent magnet Machine 77achine7777n the limitation of 77achine77 and flux-weakening capability.
- WEI HUA, M.C. Inductance characteristics of 3-phase flux switching permanent magnet 77achine with doubly salient structure.



## **ANEXO**

- Dimensiones Estator
- Dimensiones Rotor
- Datasheet Imán NdFeB
- Datasheet M270-350A
- Dataheet bobina
- Datasheet Puente rectificador trifásico
- Datasheet inversor